

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Sérgio Ricardo Reis Soares

Estruturas de betão armado reforçadas
com laminados de CFRP: caracterização da
aderência e do comportamento em flexão

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

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor José Manuel de Sena Cruz

AGRADECIMENTOS

Para tornar possível a concretização do presente trabalho estiveram envolvidas várias pessoas e entidades, às quais aproveito para demonstrar a minha gratidão e reconhecimento.

Ao Prof. José Sena Cruz, orientador científico deste trabalho, gostaria de expressar a minha gratidão por todo o apoio prestado, pela disponibilidade demonstrada ao longo deste percurso, por toda a dedicação, por todos os ensinamentos e pelo seu entusiasmo e motivação contagiante.

Ao Doutor Pedro Fernandes e ao aluno de doutoramento Ricardo Cruz, envolvidos no projeto de investigação *FRPLongDur*, manifesto o meu agradecimento por todo o apoio, pelos conselhos, disponibilidade, ensinamentos e sobretudo pela amizade. Este projeto não só me proporcionou dois grandes companheiros de trabalho mas, sobretudo, dois grandes amigos a quem estarei sempre grato.

Aos alunos de doutoramento Patrícia Silva, Mário Coelho, Luís Correia, Gonçalo Escusa, Christoph de Sousa e José Granja, pelos conselhos, ensinamentos e boa disposição.

A todos os técnicos do Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho (LEST) pelo apoio na execução dos trabalhos experimentais, em especial ao António Matos.

Aos meus amigos de sempre e aos que estes cinco anos me trouxeram, pelo apoio, compreensão, amizade e companheirismo demonstrado ao longo de todo este percurso. Em especial aos que para além de amigos foram sempre os companheiros de trabalho: Fábio Cruz, Carlos Cruz e Néilson Freitas.

À Elsa, que sempre me apoiou, pelo seu carinho, incentivo e compreensão, o meu muito obrigado.

Como não poderia deixar de ser, o meu mais profundo agradecimento é dirigido a toda a minha família que me acompanhou sempre, especialmente aos meus pais, Sérgio e Fernanda, e minha irmã Margarida.

Este trabalho foi apoiado por fundos nacionais através da FCT e cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do Programa Operacional Fatores de Competitividade e internacionalização (POCI) e do Programa Regional de Lisboa no âmbito dos projetos *FRPLongDur* POCI-01-0145-FEDER-016900 (PTDC/ECM-EST/1282/2014) e POCI-01-0145-FEDER-007633. Agradeço também a contribuição das seguintes empresas: S&P - Clever Reinforcement (oferta do laminado CFK e adesivo S&P Resin 220), Tecnipor (produção de provetes), Unibetão (produção de provetes) e Artecanter (transporte e tratamento de superfície dos provetes).

RESUMO

O recurso a materiais compósitos do tipo FRP no reforço de estruturas de betão existentes, tem vindo a ganhar maior notoriedade nas últimas décadas. Entre as técnicas de reforço mais utilizadas destacam-se a (i) EBR (*Externally Bonded Reinforcement*), que consiste na colagem do laminado na superfície do elemento a reforçar e a (ii) NSM (*Near Surface Mounted*), onde os laminados são inseridos no interior de ranhuras pré-executadas no elemento a reforçar.

A presente dissertação está inserida no projeto de investigação *FRPLongDur*, projeto este que pretende estudar a durabilidade de estruturas de betão armado reforçadas com sistemas FRP. Este trabalho é constituído por um conjunto alargado de estudos preliminares, com o objetivo de esclarecer algumas dúvidas sobre: (i) geometria e configurações de ensaio, (ii) diferentes soluções de reforço com recurso a laminados de CFRP, (iii) influência de alguns parâmetros no comportamento dos elementos reforçados. O trabalho é composto por uma parte experimental e uma parte numérica. O trabalho experimental foi constituído por dois tipos de ensaio: (i) ensaios de arranque direto para estudar o comportamento da ligação do sistema EBR CFRP e (ii) ensaios de flexão em faixas de laje de betão armado reforçadas com a técnica EBR e NSM.

Um protocolo de ensaio de arranque direto foi desenvolvido no âmbito deste trabalho, no qual foi verificado o seu bom desempenho. Nestes ensaios foram consideradas as seguintes variáveis de estudo: (i) diferentes métodos de tratamento da superfície de betão (GR - esmeril e SB - jato de areia) e (ii) diferentes comprimentos de ancoragem (150, 200 e 250 mm). Os resultados demonstraram que o maior nível de rugosidade proporcionado pelo tratamento com jato de areia permitiu melhorar o comportamento e a resistência da ligação. Reconhecida a influência da rugosidade apresentada pela superfície, foi proposta uma formulação analítica capaz de prever a resistência da ligação em função deste parâmetro. Relativamente aos ensaios de flexão em faixas de laje, foram consideradas as seguintes variáveis de estudo: (i) largura do laminado de CFRP, nas lajes reforçadas com a técnica EBR e (ii) várias soluções de reforço com a técnica NSM, que recorriam à mesma quantidade de material compósito, mas com diferentes disposições ao longo da secção transversal da faixa de laje. Os resultados demonstraram uma maior eficiência da técnica NSM relativamente à EBR. O comportamento global das lajes reforçadas com a técnica NSM foi melhorado quando o reforço se encontrava mais distribuído ao longo da sua secção transversal.

Com recurso ao software *Femix 4.0*, todos os ensaios experimentais realizados foram simulados, verificando-se a capacidade das atuais ferramentas MEF na previsão do comportamento deste tipo de elementos estruturais. A calibração dos modelos permitirá a realização de estudos paramétricos que possibilitem a análise de vários parâmetros que influenciam a sua resposta.

Palavras-chave: EBR, NSM, laminados de CFRP, aderência, reforço à flexão, simulações numéricas.

ABSTRACT

In the last decades, the fibre reinforced polymers (FRP) have been used to strengthen existing reinforced concrete (RC) structures. Among the most used strengthening techniques are (i) the EBR (Externally Bonded Reinforcement), which consists on bonding the FRP material to the surface of the elements to be strengthened and (ii) the NSM (Near Surface Mounted), which consists on inserting the FRP material in pre-cut grooves opened in the concrete cover of the elements to be strengthened.

The present dissertation is part of the *FRPLongDur* research project which aims to study the durability of RC structures strengthened with FRP systems. This work is composed of a wide set of preliminary studies and intends to clarify some doubts about: (i) the geometry and test configurations, (ii) the differences between strengthening solutions using CFRP laminates, (iii) the influence of some parameters on the behaviour of strengthened elements. The study carried out is composed of an experimental part and a numerical part. The experimental work includes two types of tests: (i) direct pullout tests in order to study the bond behaviour of the EBR CFRP system and (ii) flexural tests on RC slab strips strengthened with EBR and NSM systems.

The experimental setup for bond test was developed within the scope of this work and its good performance was verified. In these tests, the following variables were considered: (i) the methods for surface preparation (GR – Grinding and SB – Sand blasting) and (ii) the bond length (150, 200 e 250 mm). The results showed that the higher level of roughness provided by the sandblast preparation allowed to improve the bond behaviour and bond strength. Recognizing the influence of surface roughness, an analytical formulation capable of predicting bond strength in function of this parameter was proposed. Regarding of the flexural tests on strengthened RC slab strips, the following variables were considered: (i) the width of CFRP laminate with the EBR system, (ii) the different strengthened solutions with the NSM system, which used the same amount of composite material but with different arrangements along the cross section of the slab's strip. The results demonstrated a greater efficiency of the NSM system with respect to the EBR system. The global behaviour of RC slabs strengthened with the NSM system was improved when the composite material was more distributed along its cross section.

Using the software *Femix 4.0*, all the experimental tests were simulated, verifying the ability of the current FEM tools to predict the behaviour of this type of structural elements. The calibration of the models will allow the performance of parametric studies and, consequently, the analysis of the influence of several parameters on their response.

Keywords: EBR, NSM, CFRP laminates, bond, flexural strengthening, numerical simulations.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
ÍNDICE.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABELAS	xix
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação e contextualização do tema da dissertação	1
1.2 Objetivos da dissertação	3
1.3 Estrutura da dissertação	5
2 REVISÃO DO ESTADO DE CONHECIMENTO.....	9
2.1 Reabilitação de estruturas de betão armado.....	9
2.2 Aplicação de materiais compósitos no reforço estrutural.....	10
2.3 Técnicas de reforço de estruturas de betão armado com recurso a laminados de FRP	14
2.3.1 Sistema EBR (<i>Externally Bonded Reinforcement</i>).....	15
2.3.1.1 Procedimento de aplicação.....	16
2.3.1.2 Reforço à flexão	18
2.3.1.3 Comportamento da ligação entre o laminado de FRP e a superfície de betão	20
2.3.2 Sistema NSM (<i>Near-surface mounted</i>)	31
2.3.2.1 Procedimento de aplicação.....	33
2.3.2.2 Reforço à flexão	34
2.3.2.3 Comportamento da ligação entre o laminado de FRP e a superfície de betão	40
2.3.3 Sistema EBR com recurso a laminados FRP pré-esforçados	52
2.3.3.1 Sistema de ancoragem mecânico (MA)	55
2.3.3.2 Sistema de ancoragem pelo método do gradiente de temperatura (GA).....	57

2.3.3.3	Estudos realizados na aplicação do sistema EBR com recurso a laminados de FRP pré-esforçados em elementos de betão armado	60
2.4	Simulações numéricas	65
2.4.1	Conceitos introdutórios	65
2.4.2	Programa Femix 4.0	70
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	73
3.1	Introdução.....	73
3.2	Ensaio de arranque direto	74
3.2.1	Programa de ensaios.....	74
3.2.2	Geometria e configuração de ensaio	76
3.2.3	Modelo numérico de dimensionamento e previsão do desempenho do sistema de ensaio	81
3.2.4	Medição da rugosidade de superfície do betão	88
3.3	Ensaio de flexão em faixas de laje.....	90
3.3.1	Programa de ensaios.....	90
3.3.2	Geometria e configuração de ensaio	92
3.4	Caracterização dos materiais	98
3.4.1	Betão	98
3.4.1.1	Betão relativo aos provetes prismáticos para os ensaios de arranque direto	99
3.4.1.2	Betão relativo às faixas de laje para os ensaios à flexão	100
3.4.2	Varões de aço	101
3.4.3	Laminados de CFRP	102
3.4.4	Adesivo epóxi	104
3.5	Preparação dos provetes de betão.....	105
3.5.1	Betonagem	106
3.5.1.1	Provetes prismáticos	106
3.5.1.2	Faixas de laje	107
3.5.2	Tratamento da superfície de betão	109
3.5.3	Execução de ranhuras no betão	110
3.5.4	Aplicação do sistema de reforço	111

3.5.4.1	Técnica EBR	112
3.5.4.2	Técnica NSM.....	117
4	ENSAIOS DE ARRANQUE DIRETO: RESULTADOS E DISCUSSÃO	121
4.1	Caracterização da rugosidade da superfície de betão	122
4.2	Síntese dos resultados obtidos nos ensaios de arranque direto.....	126
4.3	Modos de rotura	130
4.4	Influência das variáveis em estudo	134
4.4.1	Força de arranque <i>versus</i> deslizamento na extremidade carregada.....	134
4.4.2	Força de arranque máxima	137
4.4.3	Tensão tangencial média para a força de arranque máxima.....	138
4.4.4	Energia dissipada.....	140
4.4.5	Eficiência do sistema de reforço.....	141
4.5	Relação entre a rugosidade da superfície e a força de arranque máxima	143
4.6	Comportamento da interface.....	147
4.7	Conclusões	153
5	ENSAIOS DE FLEXÃO EM FAIXAS DE LAJE: RESULTADOS E DISCUSSÃO ..	157
5.1	Síntese dos resultados obtidos	158
5.2	Curvas força <i>versus</i> deslocamento vertical.....	159
5.3	Modos de rotura	166
5.4	Extensões experimentadas pelos materiais das faixas de laje.....	168
5.4.1	Laminado de CFRP	168
5.4.2	Armadura longitudinal tracionada.....	171
5.4.3	Betão comprimido	174
5.5	Análise do nível de fendilhação	175
5.5.1	Evolução da largura de fendas.....	176
5.5.2	Padrões de fendilhação	179
5.5.3	Número de fendas, distância média entre fendas e extensão da banda de fendilhação	182
5.6	Influência das várias soluções de reforço no comportamento à flexão das faixas de laje	185
5.6.1	Carga de início de fendilhação	185
5.6.2	Carga de plastificação da armadura longitudinal tracionada.....	187
5.6.3	Carga máxima.....	189

5.6.4	Extensão máxima no laminado de CFRP.....	192
5.6.5	Ductilidade da resposta estrutural das faixas de laje reforçadas.....	194
5.7	Conclusões.....	196
6	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	199
6.1	Simulação dos ensaios de arranque direto.....	200
6.1.1	Propriedades do betão, do aço e do laminado de CFRP	202
6.1.2	Modelo constitutivo de interface.....	202
6.1.3	Força de arranque <i>versus</i> deslizamento na extremidade carregada	205
6.1.4	Distribuição das extensões axiais ao longo do comprimento de ancoragem ...	207
6.2	Simulação dos ensaios de flexão em faixas de laje	209
6.2.1	Propriedades da armadura longitudinal, transversal e dos laminados de CFRP	212
6.2.2	Lei de interface.....	213
6.2.3	Propriedades do betão	214
6.2.4	Curvas força <i>versus</i> deslocamento a meio vão - Modelos de previsão.....	217
6.2.5	Curvas força <i>versus</i> deslocamento a meio vão - Modelos calibrados.....	220
6.2.6	Curvas força <i>versus</i> extensão no laminado de CFRP	222
6.2.7	Curvas força <i>versus</i> extensão a meio vão na armadura longitudinal	224
6.2.8	Padrões de fendilhação.....	226
6.3	Conclusões.....	229
7	CONCLUSÕES	233
7.1	Principais conclusões	233
7.2	Retrospectiva do trabalho realizado e sugestões para futuros desenvolvimentos.....	236
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	239
	ANEXO I - Resultados da medição do nível de rugosidade ao longo do perfil longitudinal central do comprimento de ancoragem dos provetes prismáticos.....	245
	ANEXO II - Resultados dos ensaios de arranque direto.....	255
	ANEXO III - Fotografias das superfícies de fratura ao nível da interface CFRP/betão, observadas após os ensaios de arranque direto	257

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Projeto <i>FRPLongDur</i>	3
Figura 1.2 - Fluxograma do trabalho desenvolvido	7
Figura 2.1 - Fases constituintes dos polímeros reforçados com fibras (FRP)	11
Figura 2.2 - Relação tensão <i>versus</i> extensão das fibras, da matriz, e do material compósito. Adaptado de CNR (2013)	12
Figura 2.3 - Diagrama tensão <i>versus</i> extensão de diferentes tipos de fibras, do aço convencional A500 e de cordões de aço de pré-esforço (ACI, 1996)	13
Figura 2.4 - Configurações utilizadas no reforço à flexão com a técnica EBR (Barros et al., 2007)	18
Figura 2.5 - Zonas de possível rotura por destacamento da ligação FRP-betão quando aplicada a técnica EBR. Adaptado de CNR (2013)	21
Figura 2.6 - Reforço à flexão com o sistema EBR FRP e possíveis modos de rotura por destacamento do sistema de reforço. Adaptado de CNR (2013)	21
Figura 2.7 - Diferentes configurações de ensaios de aderência em provetes de betão reforçados com FRP, de acordo com a técnica EBR	23
Figura 2.8 - Configurações de ensaio de arranque direto simples utilizados por: (a) Subramaniam <i>et al.</i> (2007); (b) Bilotta <i>et al.</i> (2011); (c) Iovinella <i>et al.</i> (2013)	24
Figura 2.9 - Valores médios do parâmetro IR para todos os provetes antes e depois do tratamento de superfície (Iovinella <i>et al.</i> , 2013)	28
Figura 2.10 - Curvas força de arranque <i>versus</i> deslizamento na extremidade carregada obtidas nos provetes com diferentes tratamentos de superfície (Iovinella <i>et al.</i> , 2013)	29
Figura 2.11 - Reforço à flexão de uma viga de betão armado de acordo com a técnica NSM, com recurso a laminados de CFRP de secção retangular. Adaptado de Sena-Cruz (2005)	34
Figura 2.12 - Configuração do ensaio de flexão em vigas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP (Barros e Fortes, 2005)	36
Figura 2.13 - Séries de vigas ensaiadas (Barros e Fortes, 2005)	36
Figura 2.14 - Configuração do ensaio à flexão em faixas de laje (Bonaldo <i>et al.</i> , 2007)	38
Figura 2.15 - Séries de ensaio com diferentes configurações de reforço (Bonaldo <i>et al.</i> , 2007)	38

Figura 2.16 - Principais modos de rotura por destacamento numa viga reforçada à flexão com o sistema NSM CFRP	42
Figura 2.17 - Quatro possíveis modos de rotura locais da ligação. Adaptado de Coelho <i>et al.</i> (2015)	43
Figura 2.18 - Configurações de ensaio de arranque direto com a técnica NSM (Coelho <i>et al.</i> , 2015)	45
Figura 2.19 - Ensaio de arranque direto com provete em forma de “C” (De Lorenzis <i>et al.</i> , 2002)	46
Figura 2.20 - Ensaio de arranque direto com provetes cúbicos (Fernandes <i>et al.</i> , 2012)	46
Figura 2.21 - Ensaio de arranque direto com provetes prismáticos (Cruz, 2016)	47
Figura 2.22 - Ensaio de arranque em flexão recorrendo a um bloco de betão (De Lorenzis e Nanni, 2002)	48
Figura 2.23 - Ensaio de arranque em flexão recorrendo a dois blocos de betão (Sena-Cruz, 2005)	48
Figura 2.24 - Relação momento <i>versus</i> curvatura de um elemento de betão armado não reforçado, de um elemento de betão armado reforçado com um laminado de FRP sem pré-esforço e de um elemento de betão armado reforçado com um laminado de FRP pré-esforçado. Adaptado de Michels <i>et al.</i> (2016)	53
Figura 2.25 - Diferentes sistemas de pré-esforço. Adaptado de El-Hacha <i>et al.</i> (2001)	54
Figura 2.26 - Procedimento de aplicação do sistema mecânico de ancoragem (MA) (Michels <i>et al.</i> , 2016)	56
Figura 2.27 - Representação esquemática do princípio de funcionamento do sistema de ancoragem pelo método do gradiente de temperatura (GA). Adaptado de Michels <i>et al.</i> (2013)	57
Figura 2.28 - Transferência da força nos diferentes segmentos sujeitos ao gradiente de temperatura. Adaptado de Michels <i>et al.</i> (2013)	58
Figura 2.29 - Procedimento de aplicação do sistema de ancoragem pelo método do gradiente de temperatura (GA) (Michels <i>et al.</i> , 2016)	59
Figura 2.30 - Resposta das faixas de laje em termos de força <i>versus</i> deslocamento a meio vão (Pellegrino e Modena, 2009)	61
Figura 2.31 - Resposta das faixas de laje em termos de força <i>versus</i> deslocamento a meio vão (Correia <i>et al.</i> , 2015)	63

Figura 2.32 - Três modos de fratura (Broek, 2012)	66
Figura 2.33 - Ensaio de flexão sob quatro pontos de carga de uma viga de betão armado	67
Figura 2.34 - Superfície de cedência de Rankine no espaço 2D das tensões principais (Sena-Cruz, 2005)	68
Figura 2.35 - Diagramas de <i>tension-softening/stiffening</i> (Sena-Cruz, 2005)	68
Figura 2.36 - Tipos de elementos finitos disponíveis no programa <i>Femix 4.0</i> . Adaptado de Sena-Cruz (2005)	72
Figura 3.1 - Configuração do ensaio de arranque direto	77
Figura 3.2 - Disposição dos transdutores de deslocamento (LVDT) nos ensaios de arranque direto (esquema e fotografia)	80
Figura 3.3 - Distribuição dos extensómetros (SG) ao longo do comprimento de ancoragem (L_b) na superfície do laminado de CFRP	81
Figura 3.4 - Malha de elementos finitos, geometria e condições de apoio do modelo numérico de simulação do ensaio de arranque direto	83
Figura 3.5 - Deslocamentos experimentados pelo provete de betão	85
Figura 3.6 - Tensões experimentadas pelo provete de betão	86
Figura 3.7 - Elemento finito selecionado para o cálculo das tensões principais máxima e mínima	87
Figura 3.8 - Trajeto percorrido pelo laser na aquisição do nível de rugosidade em 3 perfis longitudinais da zona de ancoragem do sistema EBR CFRP-betão	88
Figura 3.9 - Fotos ilustrativas da configuração do sistema de medição da rugosidade da superfície dos provetes	89
Figura 3.10 - (a) a (g): Geometria da secção transversal e longitudinal de cada uma das faixas de laje que constitui o programa de ensaios	92
Figura 3.11 - Configuração do ensaio de flexão em faixas de laje	97
Figura 3.12 - Retificação dos provetes cilíndricos	98
Figura 3.13 - Configuração dos ensaios de caracterização do betão	99
Figura 3.14 - Curvas tensão <i>versus</i> extensão obtidas nos ensaios de caracterização dos varões de aço	102
Figura 3.15 - Resposta típica obtida em termos de tensão <i>versus</i> extensão para uma amostra de laminado de CFRP L100	104
Figura 3.16 - Principais etapas do processo de preparação dos provetes de ensaio	105
Figura 3.17 - Processo de betonagem dos provetes prismáticos	106

Figura 3.18 - Processo de betonagem das faixas de laje	108
Figura 3.19 - Tratamento da superfície de betão dos provetes de ensaio	110
Figura 3.20 - Abertura de ranhuras onde os laminados de CFRP são introduzidos, de acordo com a técnica NSM	111
Figura 3.21 - Trabalhos preparatórios (antes do reforço)	113
Figura 3.22 - Execução do reforço	115
Figura 3.23 - Provetes de ensaio reforçados com o sistema EBR, após a pintura da superfície para identificação de fendas	117
Figura 3.24 - Trabalhos preparatórios (antes do reforço)	118
Figura 3.25 - Execução do reforço	119
Figura 3.26 - Faixa de laje reforçada com sistema NSM, após a pintura da superfície para identificação de fendas	120
Figura 4.1 - Diferentes níveis de rugosidade das superfícies de betão (perfil de rugosidade obtido pelo laser e foto da superfície)	123
Figura 4.2 - Comparação do nível de rugosidade proporcionado por cada tratamento de superfície (GR e SB)	125
Figura 4.3 - Curvas força de arranque <i>versus</i> deslizamento na extremidade carregada	129
Figura 4.4 - Mecanismo de rotura observado nos ensaios de arranque direto. Adaptado de Savoia <i>et al.</i> (2007)	131
Figura 4.5 - Superfícies de fratura ao nível da interface CFRP/betão após o destacamento do sistema EBR CFRP, quando utilizadas diferentes técnicas de tratamento da superfície antes da aplicação do adesivo	133
Figura 4.6 - Superfície de fratura dos laminados de CFRP após os ensaios, quando utilizadas diferentes técnicas de preparação da superfície antes da aplicação do adesivo	133
Figura 4.7 - Curvas médias em termos de força de arranque <i>versus</i> deslizamento na extremidade carregada quando o mesmo comprimento de ancoragem e diferentes métodos de tratamento da superfície são utilizados	135
Figura 4.8 - Curvas médias em termos de força de arranque <i>versus</i> deslizamento na extremidade carregada quando diferentes comprimentos de ancoragem e o mesmo método de tratamento da superfície são utilizados	135
Figura 4.9 - Influência das variáveis em estudo na força de arranque máxima	137
Figura 4.10 - Influência das variáveis em estudo na tensão tangencial média máxima	139

Figura 4.11 - Influência das variáveis em estudo na energia dissipada	140
Figura 4.12 - Influência das variáveis em estudo na eficiência do sistema de reforço	142
Figura 4.13 - Relação entre os parâmetros FL, \max e R_m	144
Figura 4.14 - Relação entre os parâmetros kG e R_m	146
Figura 4.15 - Precisão do modelo analítico proposto (comparação entre a força de arranque máxima analítica (FL, \max, anal) e a força de arranque máxima obtida nos ensaios experimentais (FL, \max, exp))	147
Figura 4.16 - Distribuição das extensões axiais, ao longo do laminado de CFRP, em diferentes níveis de carregamento	148
Figura 4.17 - Representação esquemática da distribuição das extensões axiais ao longo da largura do laminado de CFRP, após o início do processo de destacamento do sistema de reforço	151
Figura 4.18 - Distribuição das extensões axiais nos provetes com diferentes tratamentos de superfície	152
Figura 5.1 - Curvas força <i>versus</i> deslocamento vertical a meio vão das faixas de laje	160
Figura 5.2 - Deslocamentos verticais experimentados pelas faixas de laje (deformada), para vários níveis de carregamento, até à carga máxima registada (F_{\max})	161
Figura 5.3 - Rigidez à flexão apresentada pelas faixas de laje	164
Figura 5.4 - Modos de rotura observados	167
Figura 5.5 - Curvas força <i>versus</i> extensão a meio vão no laminado de CFRP relativas a cada uma das faixas de laje	169
Figura 5.6 - Distribuição das extensões ao longo do eixo longitudinal dos laminados de CFRP, para vários níveis de carregamento, em cada uma das faixas de laje reforçadas	169
Figura 5.7 - Curvas força <i>versus</i> extensão no aço tracionado a meio vão das faixas de laje	172
Figura 5.8 - Possível posição dos extensómetros colocados na armadura	173
Figura 5.9 - Curvas força <i>versus</i> extensão no betão comprimido a meio vão das faixas de laje	174
Figura 5.10 - Monitorização da evolução da largura de fendas	176
Figura 5.11 - Evolução da largura de fendas	177
Figura 5.12 - Padrões de fendilhação observados após os ensaios de flexão das faixas de laje	179
Figura 5.13 - Padrão de fendilhação na zona de flexão pura da laje NSM_L20_P1	180

Figura 5.14 - Contagem do número de fendas, determinação da distância média entre fendas e medição da extensão da banda de fendilhação	182
Figura 5.15 - Caracterização do padrão de fendilhação	183
Figura 5.16 - Carga de início de fendilhação	186
Figura 5.17 - Carga de plastificação da armadura longitudinal	188
Figura 5.18 - Carga máxima	190
Figura 5.19 - Extensão máxima experimentada pelo laminado de CFRP	192
Figura 5.20 - Valores do parâmetro de ductilidade	195
Figura 6.1 - Malha de elementos finitos, geometria e condições de apoio dos modelos numéricos de simulação dos ensaios de arranque direto para os provetes com diferente comprimento de ancoragem adotado	201
Figura 6.2 - Curvas força de arranque <i>versus</i> deslizamento na extremidade carregada (comparação do resultado experimental e numérico)	206
Figura 6.3 - Distribuição das extensões axiais ao longo do laminado de CFRP, em diferentes níveis de carregamento (comparação do resultado experimental e numérico)	209
Figura 6.4 - Malha de elementos finitos, geometria, configuração de carregamento e condições de apoio dos modelos numéricos de simulação dos ensaios de flexão das diferentes faixas de laje	211
Figura 6.5 - Modelo constitutivo uniaxial das armaduras de reforço (Sena-Cruz, 2005)	213
Figura 6.6 - Curvas força <i>versus</i> deslocamento vertical a meio vão das faixas de laje (comparação do resultado experimental e numérico)	219
Figura 6.7 - Curvas força <i>versus</i> deslocamento vertical a meio vão das faixas de laje (comparação do resultado experimental e numérico)	221
Figura 6.8 - Curvas força <i>versus</i> extensão no laminado de CFRP (comparação das medições efetuadas experimentalmente pelos extensômetros SG4 e SG6 com o resultado numérico)	223
Figura 6.9 - Curvas força <i>versus</i> extensão no aço tracionado a meio vão das faixas de laje (comparação das medições efetuadas experimentalmente pelo extensômetro SG1 com o resultado numérico)	225
Figura 6.10 - Padrão de fendilhação obtido em cada uma das simulações numéricas das faixas de laje	228

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Programa de ensaios de arranque direto e respetivas designações	75
Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas adotadas para os diferentes materiais na simulação numérica do ensaio de arranque direto	84
Tabela 3.3 - Propriedades do sensor laser <i>SICK OD2 – N50W10U0</i>	89
Tabela 3.4 - Programa de ensaios de flexão em faixas de laje e respetivas designações	91
Tabela 3.5 - Propriedades mecânicas à compressão do betão dos provetes prismáticos	100
Tabela 3.6 - Propriedades mecânicas à compressão do betão das faixas de laje	101
Tabela 3.7 - Propriedades mecânicas dos varões de aço utilizados no programa experimental	102
Tabela 3.8 - Propriedades mecânicas dos laminados de CFRP utilizados no programa experimental	103
Tabela 3.9 - Propriedades mecânicas do adesivo epóxi utilizado no programa experimental	105
Tabela 3.10 - Dimensões médias das ranhuras onde os laminados de CFRP foram introduzidos, de acordo com a técnica NSM	111
Tabela 4.1 - Resultados da caracterização da rugosidade da superfície	125
Tabela 4.2 - Resultados obtidos nos ensaios de arranque direto (valores médios)	127
Tabela 4.3 - Relação entre força de arranque máxima (F_l , max) e rugosidade média da superfície (R_m)	143
Tabela 5.1 - Resultados obtidos nos ensaios à flexão das faixas lajes	159
Tabela 6.1 - Propriedades adotadas para os diferentes materiais na simulação numérica dos ensaios de arranque direto	202
Tabela 6.2 - Parâmetros requeridos pelo modelo constitutivo de interface	205
Tabela 6.3 - Comparação entre o valor de força de arranque máxima obtida nas simulações numéricas com o valor médio de força de arranque máxima obtida em cada série de ensaios experimentais	207
Tabela 6.4 - Propriedades adotadas para os materiais de reforço (varões de aço e laminados de CFRP) na simulação das faixas de laje	213
Tabela 6.5 - Propriedades adotadas para o betão na simulação das faixas de laje	217

Tabela 6.6 - Comparação dos valores de força e dos respectivos deslocamentos verticais a meio vão obtidos nas simulações numéricas com os valores obtidos nos ensaios experimentais 222

Tabela 6.7 - Comparação da extensão da banda de fendilhação obtida nas simulações numéricas, com extensão da banda de fendilhação medida após o ensaio experimental 229

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O mercado de reabilitação da construção e, em particular, o relativo ao reforço de estruturas de betão armado, tem vindo a ganhar grande notoriedade e preponderância na Europa ao longo dos últimos anos, onde mais de um quarto da atual produção na indústria da construção está relacionada com a manutenção e reparação de estruturas (FIEC, 2016).

De acordo com antevisões realizadas para ano de 2018 em Markets (2013), é previsto um aumento da importação de materiais compósitos para o mercado europeu da construção, podendo atingir cerca de 368 milhões de euros. Estudos mais recentes preveem uma taxa de crescimento anual de 5% no mercado da construção europeia com aplicação de materiais compósitos, entre 2015 e 2020 (Markets, 2015).

Em Portugal, existem fortes razões para acreditar que este mercado se desenvolva progressivamente nos próximos anos devido à existência de grande quantidade de edifícios em mau estado de conservação e com mais de 40 anos. Muitos destes edifícios foram construídos com escassos cuidados referentes a várias exigências regulamentares, nomeadamente em relação à ação sísmica, e apresentam-se em más condições devido à inexistência de intervenções, à ineficácia do consumo de recursos, ao baixo conforto ambiental e ao emprego de materiais pouco sustentáveis, o que faz com que edifícios existentes correspondam cada vez menos às exigências de qualidade dos ocupantes e surja a necessidade de reparação e/ou reforço. Assim, a reabilitação deve ser olhada como um caminho a seguir na resolução de problemas e como uma necessidade do edificado construído, proporcionando maior qualidade, melhor desempenho e eficiência, estabelecendo uma via direta para que a sustentabilidade ambiental, económica e social seja atingida.

1.1 Motivação e contextualização do tema da dissertação

A presente dissertação encontra-se inserida num projeto de investigação denominado *FRPLongDur* (FCT - PTDC/ECM-EST/1282/2014), projeto este que pretende contribuir para

o conhecimento do comportamento a longo prazo de elementos de betão armado reforçados com laminados de FRP. Embora já tenham sido realizados inúmeros trabalhos de investigação na área de reforço, o foco principal nesses estudos foi, até agora, o comportamento imediato e a curto prazo dos elementos estruturais. Assim, aspetos críticos como o comportamento ao longo de toda a vida útil e durabilidade de estruturas de betão armado reforçadas com FRP, requerem resultados e respostas concretas através de estudos dedicados, que tornem possível a perceção de quais as técnicas e sistemas de reforço que dão maiores garantias e em que condições ambientais as estruturas reforçadas com este tipo de material são mais afetadas. Assim, um melhor aproveitamento de todas as vantagens da utilização destas tecnologias na indústria da construção seria possibilitado. Algumas investigações têm sido realizadas no âmbito desta temática, onde se tem recorrido a ensaios de envelhecimento acelerado em ambiente laboratorial, sendo esta uma abordagem limitativa no que respeita à correlação entre estes resultados com os que se obteriam em condições reais de envelhecimento natural.

No âmbito do projeto de investigação *FRPLongDur*, serão adotados: (i) provetes à meso-escala para ensaios de caracterização dos materiais e da aderência entre o FRP e a superfície de betão e (ii) provetes à escala real com recurso a faixas de laje. Estes serão reforçados com laminados de CFRP recorrendo às seguintes técnicas de reforço: (i) técnica EBR, onde sistemas ativos (recorrendo aos sistemas de ancoragem MA e GA) e sistemas passivos serão estudados e (ii) técnica NSM. Uma vez reforçados, os provetes serão instalados em diferentes locais do país, com o objetivo de avaliar os seguintes efeitos ambientais: ação da carbonatação - CB (E2 - Lisboa), ação de cloretos - CH (E3 - Porto), ação dos fenómenos de gelo-degelo - FT (E4 - Guarda), efeito das temperaturas elevadas - ET (E5 - Évora) e em ambiente de laboratório - LAB, onde serão colocados os protótipos de referência (E1 - Guimarães). Este estudo detalhado, complementado com simulações analíticas e numéricas, irão fornecer recomendações de projeto importantes. O fluxograma geral do projeto e os pontos de localização previstos para a colocação dos diferentes provetes de betão são apresentados na Figura 1.1.

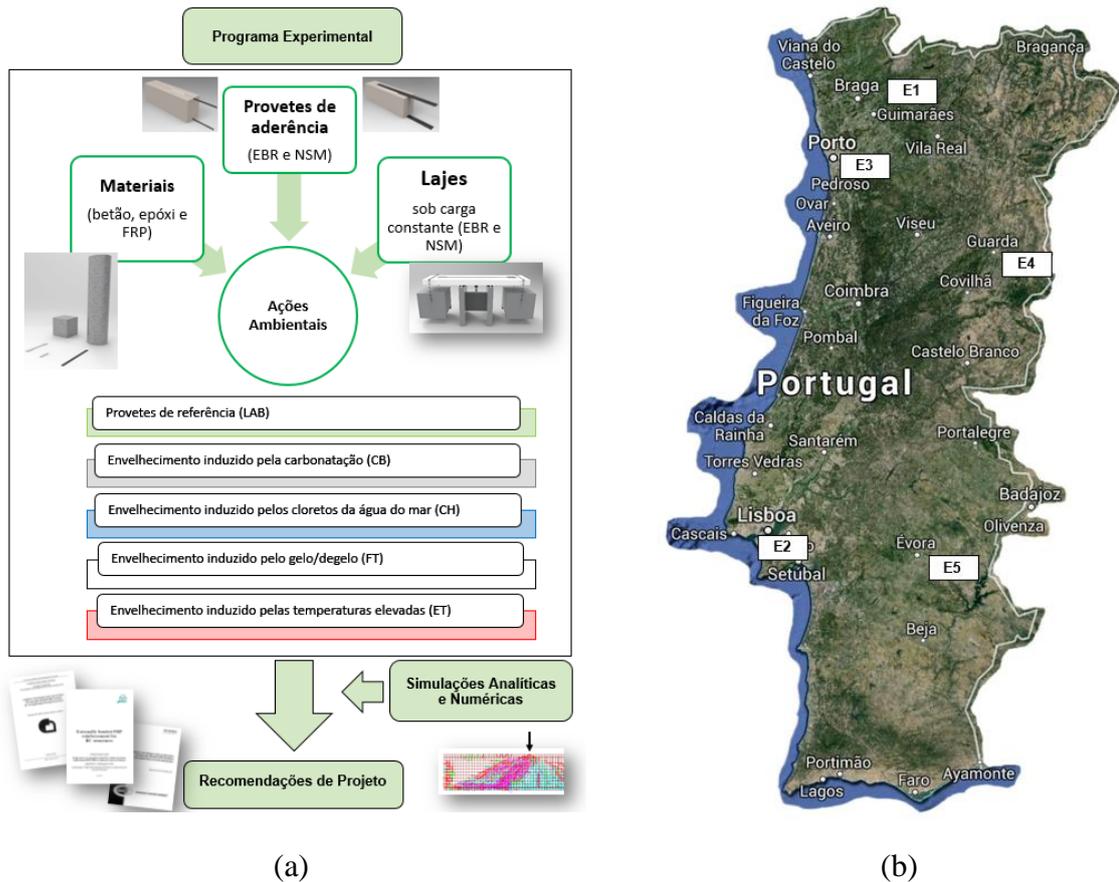


Figura 1.1 - Projeto *FRPLongDur*: (a) fluxograma geral; (b) localizações previstas para a colocação dos provetes de diferentes escalas a estudar.

Todos os provetes instalados nos vários pontos do país, serão monitorizados durante um período de dez anos e vários tipos de ensaios serão efetuados ao longo desse tempo: (i) ensaios de caracterização dos materiais (betão, epóxi e laminado de FRP), (ii) ensaios de arranque direto em cubos e prismas de betão reforçados, de modo a estudar e caracterizar o comportamento de aderência do sistema de reforço e (iii) ensaios de flexão em faixas de laje reforçadas.

1.2 Objetivos da dissertação

A presente dissertação constitui um programa alargado de estudos preliminares e tem por objetivo dar o contributo na tomada de importantes e definitivas decisões que promovam o sucesso do projeto onde esta está inserida. Assim, dúvidas em termos de configurações de ensaio, geometria dos provetes, níveis de reforço adotado e incertezas em termos da influência de outros parâmetros no comportamento estrutural dos provetes reforçados com laminados de CFRP, serão esclarecidas tanto por via experimental como analítica/numérica.

De forma mais concreta, os objetivos deste trabalho são os seguintes:

- (i) Efetuar pesquisa bibliográfica nesta área de estudo;
- (ii) Realizar uma alargada campanha experimental onde sejam incluídos:
 - Ensaios de caracterização mecânica dos materiais envolvidos (betão, varões de aço, adesivo epóxi e CFRP);
 - Ensaios de caracterização do comportamento de aderência entre o laminado de CFRP e a superfície de betão quando aplicada a técnica EBR, onde é necessário:
 - (i) analisar a configuração de ensaio adotada, visto que esta foi concebida e utilizada pela primeira vez no âmbito da presente dissertação, (ii) analisar a influência de diferentes métodos de tratamento da superfície de betão que proporcionam diferentes níveis de rugosidade, previamente à colagem externa do laminado e (iii) analisar a influência do comprimento da ligação adotado entre a superfície de betão e o laminado de CFRP;
 - Ensaios de flexão em faixas de laje, onde serão estudadas as técnicas de reforço que serão utilizadas no projeto de investigação, bem como, vários parâmetros que influenciam o seu comportamento estrutural: (i) várias geometrias de secção transversal de laminados quando utilizada a técnica EBR e NSM, (ii) diferentes disposições geométricas dos laminados de CFRP ao longo da secção transversal das faixas de laje e diferentes profundidades das ranhuras onde estes são instalados, quando utilizada a técnica NSM;
- (iii) Simular numericamente num programa de análise estrutural, que recorre ao método dos elementos finitos (MEF), os ensaios experimentais realizados;
- (iv) Analisar todos os resultados, retirando as conclusões necessárias que proporcionem decisões mais assertivas no projeto de investigação;
- (v) Acompanhar e participar em todas as tarefas relacionadas com o projeto de investigação, contribuindo com todo o estudo realizado no âmbito da presente dissertação.

1.3 Estrutura da dissertação

No Capítulo 1 é estabelecido um enquadramento geral do tema da presente dissertação, onde se esclarece a sua inserção no projeto de investigação *FRPLongDur* e se especifica quais os principais objetivos da sua realização.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão do estado de conhecimento sobre os temas abordados, nomeadamente a aplicação de materiais compósitos no reforço de estruturas de betão armado, as diferentes técnicas utilizadas no reforço e modelações numéricas que simulem o seu comportamento estrutural. Um estudo mais aprofundado foi realizado no âmbito das diferentes técnicas de reforço que recorrem a materiais compósitos, onde são detalhados os respetivos processos de aplicação e apresentados alguns estudos já realizados sobre o seu desempenho tanto ao nível de comportamento em flexão como ao nível do comportamento de aderência entre o material compósito e o betão. Por fim, é apresentada uma breve descrição do *software* de análise estrutural utilizado (*Femix 4.0*) na simulação numérica dos ensaios experimentais realizados.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia experimental desenvolvida no estudo do comportamento estrutural de elementos de betão reforçados com a técnica EBR e NSM. Neste, é descrito em detalhe o programa de ensaios desenvolvido, a geometria dos provetes utilizados bem como as configurações de ensaio adotadas. Ainda neste capítulo são apresentadas as propriedades mecânicas dos materiais que constituem os provetes reforçados de ensaio, bem como a descrição dos respetivos ensaios de caracterização. Todas as fases que constituem a preparação dos provetes de ensaio, desde a sua fase de betonagem até ao processo de reforço com laminados de CFRP, são também descritas detalhadamente nesta secção.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de arranque direto em complementaridade com a análise detalhada da influência dos parâmetros estudados no comportamento de aderência entre o betão e o laminado de CFRP.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de flexão em faixas de laje. Uma análise detalhada dos vários parâmetros em estudo que influenciam o comportamento à flexão das faixas de laje é também efetuada nesta secção.

O Capítulo 6 é referente às simulações numéricas realizadas no programa de elementos finitos *Femix 4.0*. Para além da descrição da estratégia adotada na simulação numérica dos ensaios realizados e apresentação dos resultados obtidos, é efetuada uma análise comparativa entre o comportamento estrutural obtido numericamente e experimentalmente.

No Capítulo 7 é apresentado um resumo geral da investigação científica realizada bem como as principais conclusões retiradas. Algumas sugestões para trabalhos futuros são também apresentadas nesta secção.

Com base nos objetivos estabelecidos e na estrutura proposta para a presente dissertação, a Figura 1.2 apresenta o fluxograma geral do trabalho desenvolvido.

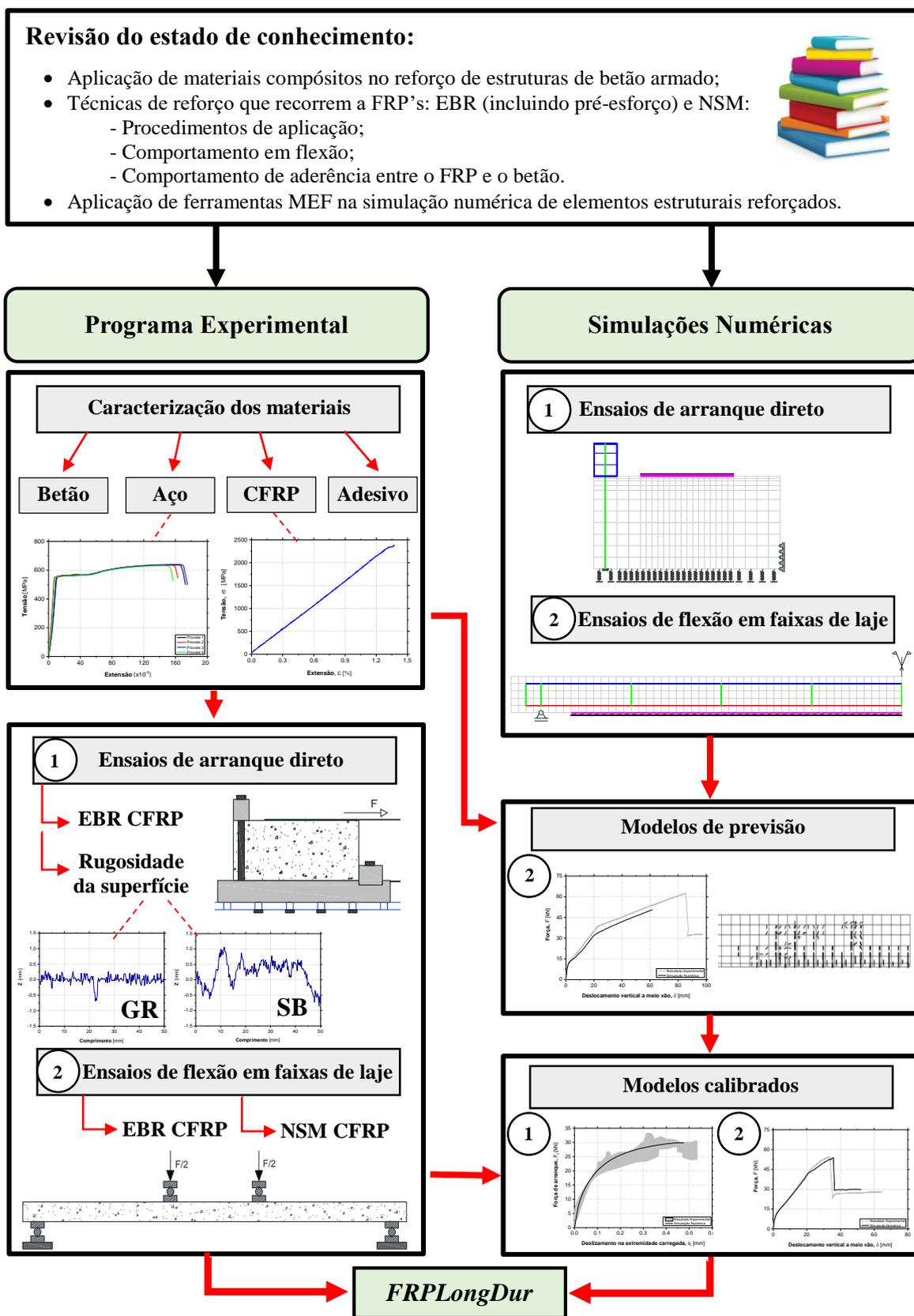


Figura 1.2 - Fluxograma do trabalho desenvolvido.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DO ESTADO DE CONHECIMENTO

2.1 Reabilitação de estruturas de betão armado

Previamente a uma intervenção de reabilitação, é necessário conhecer pormenorizadamente a estrutura existente, tanto ao nível do seu comportamento estrutural como o estado de degradação que esta apresenta. Apenas numa fase posterior se procede a qualquer tipo de intervenção que pode ser de três tipos: (i) manutenção, que consiste em manter o nível de desempenho original, (ii) reparação, onde a capacidade inicial do elemento/estrutura é reposta, (iii) reforço, onde o nível de desempenho estrutural é aumentado. Quanto à necessidade de serem tomadas medidas de reparação/reforço, esta pode surgir por variadas razões: (i) eliminar problemas estruturais que podem resultar de carregamentos excessivos, condições de exposição ambiental, erros de projeto, execuções inapropriadas, ação do sismo, ação do fogo, inundações, explosões, assentamentos excessivos, entre muitos outros, (ii) existir contínua conformidade com os códigos em vigor e (iii) permitir alteração do uso da estrutura pois ao longo da sua vida útil, pode ser exigida a capacidade de suportar um espetro mais alargado de carregamento.

Sucintamente, as estruturas de betão armado estão, ao longo da sua vida útil, sujeitas a vários mecanismos de dano que resultam na degradação do betão e das armaduras. Estes podem ser divididos em três tipos de ações principais: (i) ações químicas (reações álcali-agregado, carbonatação, corrosão, lixiviação, ações de ácidos e sais), (ii) ações físicas (fenómenos de fluência, fadiga, ação do fogo, ciclos gelo/degelo, assentamentos de apoio, sobrecargas, variações térmicas) e (iii) ações biológicas (atividades de organismos vivos e acumulação de pó e lixo).

Face a todas estas razões, surgiu a necessidade de serem desenvolvidos métodos adequados e capazes de aumentar a viabilidade do processo de reforço, tornando-o mais eficaz, mais sustentável, mais ágil, mais fácil de aplicar e com maior durabilidade. Entre as técnicas de reforço tradicionais mais utilizadas incluem-se os (i) “encamisamentos” em betão armado, onde a secção do elemento estrutural é alargada, (ii) o pré-esforço externo, (iii) a redução de vãos

com colocação de suportes adicionais que diminuem a amplitude dos esforços instalados nos elementos estruturais e (iv) a colagem de chapas de aço na superfície exterior de elementos estruturais. Estas técnicas revelam-se em muitos casos eficientes, mas por vezes dispendiosas e difíceis de aplicar.

2.2 Aplicação de materiais compósitos no reforço estrutural

Durante os últimos anos, tem-se assistido a um aumento da aplicação de materiais compósitos. Estes começaram a ser utilizados no campo aeronáutico e têm vindo a alargar o seu uso para outras indústrias como o caso da reabilitação de estruturas de betão armado. Estas técnicas de reforço inovadoras recorrem ao uso de FRP's (*Fiber Reinforced Polymers*). A elevada rigidez à tração, o baixo peso, o bom comportamento à fadiga, a imunidade à corrosão e a versatilidade geométrica dos compósitos FRP, fazem destes uma boa alternativa aos sistemas de reforço tradicionais (Sena-Cruz *et al.*, 2014).

De forma mais concreta e, de acordo com Sena-Cruz *et al.* (2011), a utilização de materiais compósitos FRP no reforço estrutural apresentam as seguintes principais vantagens: aumento da resistência à flexão/corte, aumento do grau de confinamento, redução da deformação, permite um melhor controlo da largura e distribuição de fendas, apresentam elevada razão resistência/peso, para além de ser um material com espessura reduzida, flexível, leve e de fácil aplicação, não suscetível a corrosão e com elevada capacidade de dissipação de energia. A aplicação deste tipo de materiais também apresenta algumas desvantagens, tal como o facto de o seu comportamento não apresentar um patamar de cedência e de a sua rotura ser frágil. Como principais desvantagens na utilização destes materiais também se destaca o facto de serem materiais relativamente recentes, sobre os quais ainda existem lacunas no conhecimento e escassez de normas de projeto, quando comparados a materiais tradicionais como o aço e o betão. Para além disso, e em termos de propriedades do material, estes possuem uma baixa resistência ao fogo, baixo módulo de elasticidade e suscetibilidade a ação de raios UV. As propriedades destes materiais são muito dependentes do volume, da orientação e do tipo de fibras que os constituem, bem como do tipo de resina utilizada no reforço e do respetivo tipo de cura. Em termos económicos, estes materiais revelam alguma dispendiosidade inicial.

Quanto à sua composição, os materiais compósitos são constituídos por duas ou mais fases de materiais, cujo desempenho é pensado de modo a que o FRP possua melhores propriedades mecânicas, físicas e funcionais relativamente aos materiais que o constituem. Geralmente existem as três fases ilustradas na Figura 2.1.

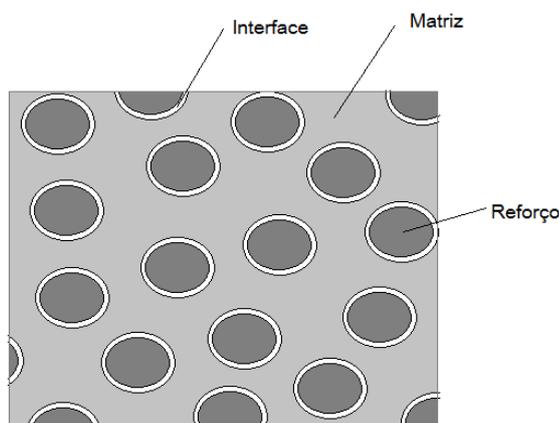


Figura 2.1 - Fases constituintes dos polímeros reforçados com fibras (FRP).

A fase do reforço (fibras) corresponde à fase descontínua responsável pela rigidez e resistência do sistema. Por sua vez, a matriz é geralmente contínua e possui menos rigidez e resistência. Esta é a responsável por garantir a proteção das fibras de agressões ambientais, danos mecânicos e fenómenos de instabilidade, bem como garantir a transferência local de tensões entre as próprias fibras e entre estas e o elemento estrutural a reforçar. Existem variados tipos de matrizes, entre as quais se destacam, no que diz respeito ao fabrico de compósitos, as poliméricas, as metálicas, as cerâmicas e as de carbono. As mais utilizadas em polímeros reforçados com fibras são as matrizes poliméricas, podendo estas ser do tipo termoendurecíveis (como é o caso do epóxi), poliamidas e polyester, ou do tipo termoplásticas (como é o caso do polysulfone e o polyether-ether-ketone). Frequentemente, a escolha tem recaído em resinas poliméricas termoendurecíveis do tipo epóxi, devido às excelentes propriedades de aderência à maior parte dos materiais, à sua resistência (mecânica e à agressividade do meio) e também pelo facto de não absorverem água. A interface existe devido à interação química entre a matriz e o reforço, controlando os mecanismos de rotura e de fratura por tenacidade para além de ser a responsável pela resposta global do compósito em termos de tensão *versus* extensão (Sena-Cruz *et al.*, 2011).

Na Figura 2.2 é apresentada a típica resposta de tensão *versus* extensão correspondente às três fases constituintes explicitadas anteriormente. Como é verificado, o material compósito apresenta menor rigidez do que as fibras. Torna-se importante destacar que o reforço é o material que condiciona a rotura do FRP, pois esta ocorre quando as fibras atingem a sua extensão limite. Além disso, é também conclusivo que a rigidez e resistência do sistema compósito é diretamente proporcional à quantidade de fibras e o “segredo” do sucesso do desempenho do FRP está, sendo assim, nas propriedades do conjunto fibra-matriz e da sua mútua interação.

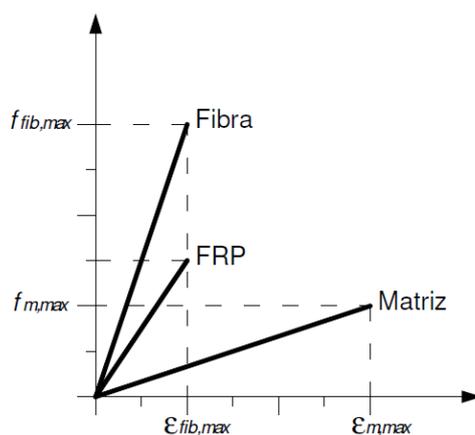


Figura 2.2 - Relação tensão *versus* extensão das fibras, da matriz, e do material compósito. Adaptado de CNR (2013).

No campo da engenharia civil, mais concretamente no ramo do reforço estrutural, os polímeros reforçados com fibras mais utilizados são os reforçados com fibras de carbono (CFRP - *Carbon Fiber Reinforced Polymers*), os polímeros reforçados com fibras de vidro (GFRP - *Glass Fiber Reinforced Polymers*) e os polímeros reforçados com fibras de aramida (AFRP - *Aramid Fiber Reinforced Polymers*), por ordem decrescente de intensidade de utilização, respetivamente. De facto, os primeiros apresentam características mecânicas de nível superior em relação aos restantes, tais como a sua baixa densidade, a elevada resistência à tração e à fadiga, a elevada rigidez, a menor suscetibilidade a rotura devido a fenómenos de fluência e maior durabilidade em ambientes agressivos. Deste modo, o CFRP torna-se o mais adequado no reforço de estruturas de betão armado. Por sua vez, as fibras de vidro têm a vantagem de serem menos dispendiosas relativamente às de carbono, embora com as desvantagens de possuírem maior peso específico e grande sensibilidade a meios alcalinos. Relativamente às fibras de aramida, estas apresentam uma maior dificuldade de moldagem, uma menor resistência à compressão e

são mais sensíveis a fenômenos de fluência, ação de raios UV e temperaturas elevadas (Barros, 2004).

Sendo os compósitos constituídos por fibra de carbono, os mais utilizados e adequados para o reforço de estruturas de betão armado, serão os utilizados no âmbito da presente dissertação.

Na Figura 2.3, apresentam-se os diagramas tensão *versus* extensão representativos do comportamento à tração uniaxial dos seguintes materiais: aço convencional A500, cordões de armadura de pré-esforço, fibras de carbono de elevado módulo de elasticidade “HM”, fibras de carbono de alta resistência “HS”, fibras de aramida e fibras de vidro. É importante referir que apesar das fibras possuírem menor densidade relativamente aos materiais convencionais, a sua resistência é significativamente superior. As fibras de carbono podem atingir valores de módulo de elasticidade superiores a 600 GPa (Barros, 2004).

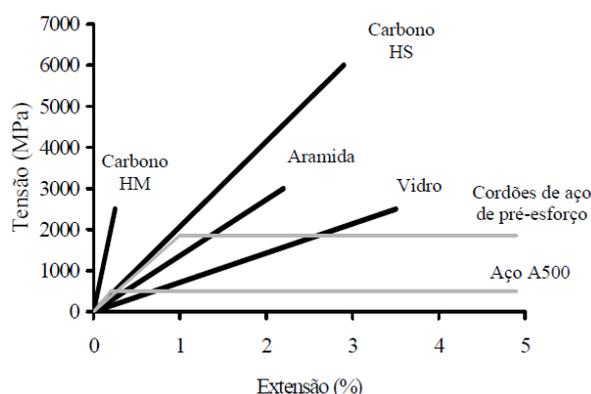


Figura 2.3 - Diagrama tensão *versus* extensão de diferentes tipos de fibras, do aço convencional A500 e de cordões de aço de pré-esforço (ACI, 1996).

No reforço de estruturas de betão armado e de acordo com o processo de produção, os sistemas FRP podem ser classificados da seguinte forma: (i) sistemas pré-fabricados, produzidos por pultrusão ou laminação, pré-curados, sendo estes aplicados diretamente no elemento estrutural a reforçar. Estes podem ser fornecidos sob a forma de perfis e podem apresentar várias geometrias de secção como o caso da secção circular (varão) e da secção retangular ou quadrada (laminado), ambas com as fibras dispostas na direção longitudinal do elemento (reforço unidirecional); (ii) sistemas curados *in situ*, constituídos por mantas ou tecidos de fibras numa ou em várias direções. Neste caso, a matriz e as fibras são fornecidas em separado e o processo de fabrico do compósito FRP é efetuado na zona a reforçar. Estes apresentam uma maior

flexibilidade relativamente aos laminados e aos varões, tornando-se mais adequados na aplicação em superfícies curvas; (iii) sistemas *prepeg*, constituídos por mantas ou tecidos unidirecionais ou multidirecionais pré-impregnados na fase de produção e parcialmente polimerizados com resina. Estes podem ser aplicados com ou sem incremento de resina (Sena-Cruz *et al.*, 2011).

2.3 Técnicas de reforço de estruturas de betão armado com recurso a laminados de FRP

Nas últimas décadas, têm sido propostas diversas técnicas de reforço com recurso a polímeros reforçados com fibras (FRP), com o objetivo de melhorar o desempenho de estruturas existentes. Estas técnicas de reforço encontram-se bem conhecidas entre investigadores, projetistas e construtores, sendo que, no caso de estruturas de betão armado, as técnicas mais utilizadas são: (i) EBR (*Externally Bonded Reinforcement*), onde compósitos são colados externamente à estrutura a reforçar e (ii) NSM (*Near-Surface Mounted*), onde os compósitos são inseridos no betão de recobrimento. Em ambas as técnicas, os FRP's são geralmente colados ao membro estrutural com recurso a adesivos epoxídicos, que permitem a transmissão de tensões entre o substrato e o material de reforço sem perda da sua integridade estrutural. Os FRP's mais utilizados neste tipo de reforço são os constituídos por fibra de carbono (CFRP) devido a inúmeras vantagens já mencionadas.

Em alguns casos específicos, a utilização de FRP's pré-esforçados no reforço de estruturas de betão armado é conveniente e muitas vezes até requerida, o que complementa a vantagem de pré-esforço externo com as vantagens da técnica EBR (quando esta é a técnica utilizada). A eficiência do uso de FRP's pré-esforçados depende muito do sistema de ancoragem utilizado, devido à sua grande influência na absorção das tensões de corte que surgem na interface da ligação entre FRP e betão ao nível das extremidades dos laminados. No presente trabalho, serão abordados dois sistemas distintos de ancoragem: sistema de ancoragem mecânico (MA - *Mechanical Anchorage*) e o sistema de ancoragem pelo método do gradiente de temperatura (GA - *Gradient Anchorage*).

2.3.1 Sistema EBR (*Externally Bonded Reinforcement*)

A aplicação de FRP's com recurso à colagem externa de laminados/mantas (técnica EBR) no elemento estrutural a reforçar, foi a primeira técnica a tornar-se conhecida consequente duma direta transposição da técnica de colagem exterior de chapas de aço. Esta tem vindo a ser a técnica mais utilizada, proporcionando um aumento da capacidade de carga e rigidez dos elementos, com uma execução relativamente simples e rápida. A níveis de carga de serviço, a técnica EBR possibilita a redução do nível de fendilhação e deformação. Os FRP's são geralmente colados à superfície do elemento estrutural de betão com recurso a um adesivo epoxídico estrutural.

Quando comparada com as técnicas tradicionais (como por exemplo a colocação de chapas metálicas, ou o aumento da secção de betão armado), a técnica EBR com recurso a FRP's, apresenta as principais vantagens relativas à sua leveza e alta resistência do material usado. Além disso, como o FRP apresenta resistência elevada, uma menor quantidade de material utilizado pode atingir o mesmo nível de reforço do que grandes quantidades de betão ou aço. Um dos maiores problemas associados a esta técnica de reforço está relacionado com a rotura prematura por destacamento do FRP. Consequentemente, no instante da rotura, a tensão neste instalada pode ser muito inferior à sua capacidade resistente, principalmente quando o elemento está sujeito a um nível de carregamento muito elevado (Sena-Cruz *et al.*, 2014).

O desempenho desta técnica depende muito da resistência do betão de recobrimento, que é normalmente a zona de betão mais degradada (devido à exposição ambiental), o que pode levar a roturas prematuras. A qualidade do reforço é, também, diretamente influenciada pelo desempenho da ligação entre o FRP e a superfície de betão. Consequentemente, é recomendável ter um especial cuidado que possibilite melhorar a aderência desta interface, pois é nesta que se dá a transmissão de esforços entre o betão e o material de reforço. Estes dois aspetos tornam necessário que, numa fase prévia à instalação do sistema de reforço, se proceda à remoção completa da superfície de betão em mau estado de conservação, pois é imprescindível que este apresente condições mínimas de resistência (a tensão mínima resistente que deve ser verificada no betão é de 1.5 MPa e 15 MPa, em tração e compressão, respetivamente). Se necessário, as armaduras devem ser reparadas, limpas, protegidas ou até mesmo adicionadas e devem ser seladas as fissuras existentes, para que no máximo possuam 0.5 mm (Sena-Cruz *et al.*, 2014).

Outro fator muito importante para o sucesso do reforço com a técnica EBR é o controlo da temperatura máxima a que a estrutura reforçada será sujeita durante a sua vida útil, principalmente o adesivo epoxídico. Este, ao atingir a temperatura de transição vítrea (T_g), passa do estado vítreo e rígido, ao estado plástico, comprometendo por completo o funcionamento do reforço, visto que a componente polimérica torna-se muito macia devido à redução abrupta do seu módulo de elasticidade. O facto de serem expectáveis temperaturas elevadas de serviço, não implica desde logo a desistência da execução do reforço, mas carece obrigatoriamente de medidas preventivas, tal como uma proteção térmica eficaz que mantenha o sistema abaixo de uma temperatura máxima de segurança. Devido à mesma característica da resina, a ação do fogo também necessita de especial atenção. Deste modo, deve ser garantido que durante um tempo mínimo de segurança, aquando a atuação do fogo, as temperaturas do reforço se mantenham a um nível que permita retardar a perda total das propriedades resistentes do adesivo. Devido ao sistema de reforço ser colado exteriormente, este sistema também estará mais vulnerável a agressões mecânicas (ações acidentais e atos de vandalismo), devendo ser previstas algumas medidas de proteção (Marques, 2009).

2.3.1.1 Procedimento de aplicação

Para aplicar a técnica EBR, com recurso a laminados de FRP, os seguintes passos devem ser seguidos:

- (i) Preparação da superfície, com o objetivo de retirar a leitada superficial de cimento até ficarem expostos os agregados. Normalmente é realizado com jato de areia, esmeril, jato de água, martelo de agulhas, entre outros métodos que permitam obter uma rugosidade adequada na superfície. Quando a superfície não é completamente plana, esta deve ser regularizada com cimento, por exemplo, para evitar descontinuidades. Em cada dois metros, a irregularidade não deve exceder os 10 mm. O substrato de betão deve ser limpo com recurso a um jato de ar comprimido;
- (ii) No caso de o betão ter resistência insuficiente e se encontrar em muito mau estado de conservação, pode ser necessário aplicar um primário, com o objetivo de preencher os poros do substrato e aumentar a aderência da interface FRP-betão. É importante referir que o primário possui mau comportamento a altas temperaturas,

sob as quais deve ser evitada a sua aplicação. Além disso, torna-se crucial cumprir tempos de cura, para ser possível aplicar o adesivo posteriormente;

- (iii) Cortar e limpar os laminados com recurso a um solvente apropriado como a acetona;
- (iv) Proceder à mistura do adesivo de acordo com as recomendações do fornecedor e aplicar na superfície do laminado e no substrato de betão. Deve existir especial cuidado na mistura, de modo a evitar a formação de vazios;
- (v) Aplicação manual e ajuste do laminado na superfície de betão. Com recurso a um rolo rígido, após a colocação do laminado, este deve ser pressionado contra a superfície. Esta fase tem especial importância, para possibilitar que exista adequada transferência de tensões por aderência e evitar que o adesivo trabalhe mecanicamente quando sujeito a cargas permanentes (fenómeno de fluência);
- (vi) Remoção do excesso de adesivo;
- (vii) Respeitar o tempo de cura do adesivo indicado pelo fornecedor, durante o qual a estrutura não deverá sofrer qualquer tipo de solicitação, de modo a tornar possível tirar todo o proveito do desempenho do sistema de reforço.

Um aspeto importante realçar recai sobre os cuidados a ter na utilização do adesivo epoxídico em qualquer uma das técnicas de reforço abordadas neste documento. A resina deve ser conservada nas suas embalagens dentro do tempo recomendado (designado “*shelf time*”) para que as suas propriedades ainda sejam as adequadas à sua aplicação. Além disso, é necessário respeitar o tempo de utilização (designado “*pot life*”), que traduz o intervalo de tempo após a mistura da resina base com os restantes componentes, durante o qual o material é aplicável sem qualquer dificuldade. Assim que se esgota este intervalo de tempo, a mistura perde drasticamente as suas características de aderência não sendo possível utilizá-la. Normalmente este período é, sensivelmente, de 25 minutos para uma temperatura de aproximadamente 23°C. No caso da temperatura ser superior à referida, diminui o tempo no qual o epóxi pode ser aplicado.

No Capítulo 3 do presente documento, onde o programa de ensaios realizado é apresentado, todos os referidos passos de aplicação do reforço segundo a técnica EBR serão devidamente ilustrados, visto que esta foi uma das técnicas utilizadas na investigação experimental desenvolvida.

2.3.1.2 Reforço à flexão

O estudo das potencialidades da técnica EBR tem sido alargado na comunidade científica. Os resultados têm vindo a demonstrar um bom desempenho do sistema no reforço à flexão, aumentando a resistência do elemento não só em serviço, mas também na capacidade última. Como já referido anteriormente, um dos maiores problemas do uso desta técnica está relacionado com a rotura prematura por destacamento do laminado de FRP, onde, nesse instante, ainda não teria atingido a sua resistência à tração, impossibilitando o esgotamento da sua capacidade resistente. Contudo, este modo de rotura, ocorre geralmente para um valor de carga superior ao que resulta na cedência das armaduras, fazendo com que o sistema de reforço permita melhorar o comportamento à flexão do elemento estrutural.

Barros *et al.* (2007), realizaram uma alargada campanha experimental de ensaios à flexão, com o objetivo de analisar a eficácia da técnica EBR com recurso a laminados de CFRP, no reforço à flexão e ao corte. A influência da taxa de reforço equivalente utilizado no reforço à flexão e da altura geométrica da viga no comportamento ao corte, foi analisada. Na Figura 2.4 são representadas as configurações geométricas das vigas ensaiadas pelos autores, na avaliação do comportamento à flexão.

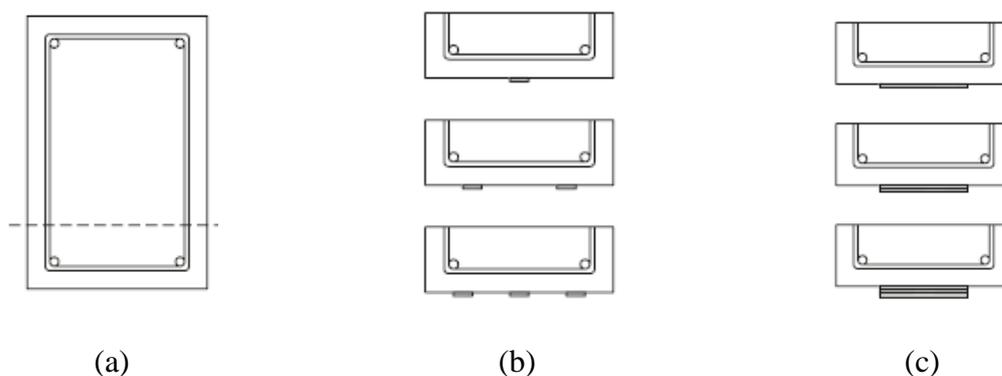


Figura 2.4 - Configurações utilizadas no reforço à flexão com a técnica EBR (Barros et al., 2007): (a) viga de referência; (b) vigas reforçadas à flexão usando diferentes quantidades de laminados de CFRP; (c) vigas reforçadas à flexão usando diferentes quantidades de mantas de CFRP.

Os resultados do reforço à flexão demonstraram que, em termos de carga de serviço, todas as vigas reforçadas tiveram incrementos sensivelmente superiores a 40% quando comparadas com a viga de referência, com exceção da viga reforçada com uma camada de manta de CFRP onde

foi atingida uma carga de serviço cerca de 82% superior à mesma. Em termos de carga máxima, embora todas as vigas reforçadas apresentassem aumentos em relação à viga de referência, os valores obtidos não foram tão regulares. Os incrementos de carga última obtidos foram de 5%, 72% e 20% para as vigas reforçadas com um, dois e três laminados, respetivamente, e de 17%, 64% e 22% para as vigas reforçadas com uma, duas e três mantas, respetivamente. Os modos de rotura frequentemente observados nos ensaios foram o destacamento do FRP com remoção de uma camada de betão de recobrimento, por vezes após a cedência das armaduras longitudinais.

Sena-Cruz *et al.* (2010), também avaliaram a eficácia de várias técnicas de reforço à flexão aplicadas em vigas de betão armado. As técnicas de reforço estudadas foram a EBR, a NSM (que será abordada posteriormente neste documento), e a técnica MF-EBR (*Mechanically Fastened and Externally Bonded Reinforcement*). Esta última técnica referida não será abordada em detalhe na presente dissertação. De forma breve, consiste na aplicação da técnica EBR com a diferença de que, para além da colagem do laminado à superfície de betão através de um adesivo estrutural, este também é fixo através de “pinos” metálicos pouco espaçados ao longo do comprimento longitudinal do laminado, com o objetivo de prevenir o destacamento precoce do reforço. As vigas reforçadas e a respetiva viga de referência (sem reforço), de secção transversal retangular ($200 \times 300 \text{ mm}^2$) e comprimento longitudinal de 2200 mm, foram ensaiadas à flexão num sistema de ensaio sob quatro pontos de carga. Os resultados demonstraram que todos os sistemas de reforço aumentaram a capacidade resistente em relação à viga de referência em 37%, 87% e 86%, respetivamente para as vigas reforçadas com a técnica EBR, MF-EBR e NSM. Um aspeto importante notar foi o facto de na técnica MF-EBR, as ancoragens pré-esforçadas contribuírem para a sua maior eficácia, evitando a rotura prematura por destacamento do laminado de FRP (tal como ocorreu quando aplicada a técnica EBR), o que permitiu que o laminado esgotasse a sua capacidade resistente. Estes resultados demonstram claramente a maior debilidade do uso da técnica EBR no reforço à flexão, onde a resistência à tração do FRP não é, geralmente, esgotada por completo.

2.3.1.3 Comportamento da ligação entre o laminado de FRP e a superfície de betão

A ligação do FRP ao substrato de betão é um problema crítico que influencia muito a eficácia da técnica EBR no reforço e reparação de elementos estruturais. O sistema betão-FRP é obtido principalmente pela adesão química proporcionada pelo uso de um adesivo e a rotura ocorre frequentemente ao nível da sua ligação. Assim, torna-se muito importante realizar estudos ao nível da interface, pois o mecanismo de rotura por destacamento do FRP (perda de adesão) é frágil, ocorrendo de forma repentina e sem qualquer aviso prévio (Aiello e Leone, 2008).

Na aplicação da técnica EBR com recurso a laminados de FRP, no reforço à flexão de estruturas de betão armado, a tensão instalada no laminado vai sendo transferida para o betão principalmente por tensões de corte ao nível do adesivo. Quando a resistência da ligação é atingida, inicia-se o destacamento do elemento de reforço de acordo com um dos modos de rotura que posteriormente serão explicitados. Durante o processo de destacamento, é possível observar um deslizamento da zona que é capaz de transferir tensões (zona ativa), o que significa que apenas uma parte da ligação é eficaz. Sendo assim, a resistência da ligação vai sendo gradualmente perdida na zona carregada, com a evolução da propagação de fendas no betão, mas, ao mesmo tempo, zonas mais afastadas do carregamento vão sendo ativadas e dando a sua contribuição na transferência de tensões. Este fenómeno leva a um conceito muito importante no reforço à flexão com laminados de FRP segundo a técnica EBR, denominado comprimento efetivo de ancoragem, a partir do qual o aumento do comprimento de ligação não se traduz num aumento da resistência da mesma, o que pode significar a impossibilidade de ser atingida a resistência última do laminado de FRP (Mazzotti *et al.*, 2016).

Mecanismos de Rotura

Quando se utiliza a técnica EBR com recurso a laminados de FRP, no reforço de estruturas de betão, os mecanismos de rotura possíveis são: (i) a rotura do FRP, ou, mais frequentemente, (ii) a rotura prematura por destacamento do sistema de reforço em relação à superfície de betão.

No sistema composto pelos três materiais (FRP, adesivo e betão), tal como é demonstrado na Figura 2.5, o mecanismo de destacamento do reforço FRP pode ocorrer no betão, ao nível da interface betão/adesivo, no próprio adesivo ou no FRP.

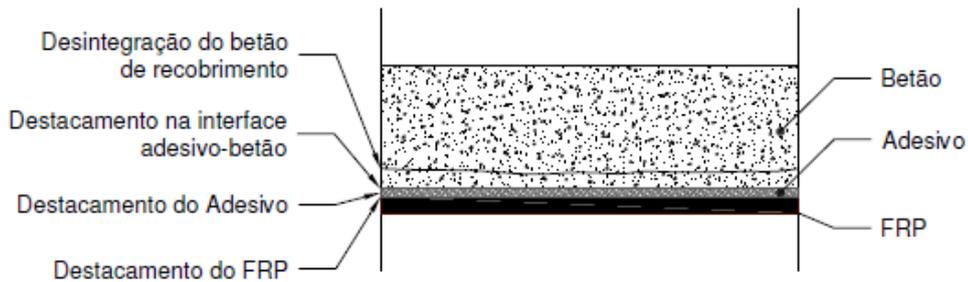


Figura 2.5 - Zonas de possível rotura por destacamento da ligação FRP-betão quando aplicada a técnica EBR. Adaptado de CNR (2013).

Quando o sistema de reforço é adequadamente instalado, devido ao facto da resistência do adesivo ser superior à resistência do betão, o destacamento do FRP surge no próprio betão com remoção de uma camada deste (rotura coesiva no betão). Quando se recorre à utilização de laminados de FRP no reforço à flexão (ver Figura 2.6), os modos de rotura anteriormente abordados podem ser divididos em quatro categorias: (i) Modo 1, onde o destacamento se processa na extremidade do laminado, (ii) Modo 2, onde o destacamento ocorre numa zona intermédia causado por fendas de flexão, (iii) Modo 3, onde o destacamento é causado por fendas de corte diagonais e (iv) Modo 4, onde o destacamento do laminado é causado por irregularidades da superfície de betão (Mazzotti *et al.*, 2016).

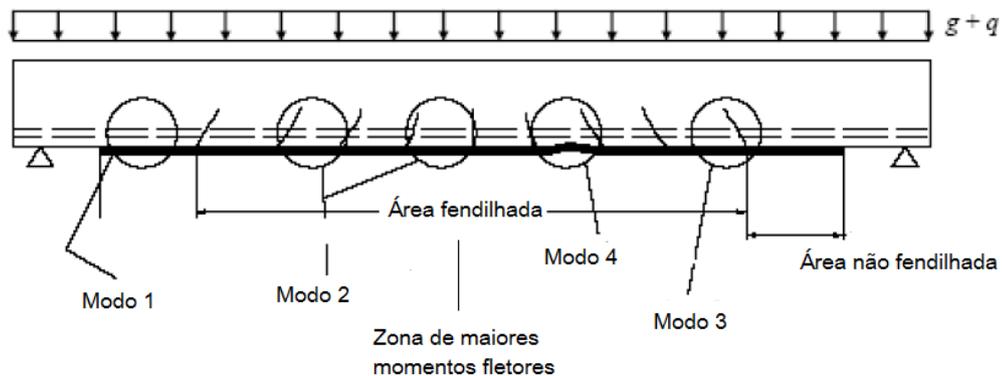


Figura 2.6 - Reforço à flexão com o sistema EBR FRP e possíveis modos de rotura por destacamento do sistema de reforço. Adaptado de CNR (2013).

Configuração de ensaios de caracterização da aderência da ligação

Uma gama alargada de configurações de ensaio tem vindo a ser proposta e utilizada no estudo da ligação entre FRP e a superfície de betão. No entanto, até aos dias de hoje, não existe nenhum procedimento padrão definido. De forma geral, as configurações de ensaio utilizadas podem variar em termos condições de carregamento e em termos de número de faces do provete reforçadas e ensaiadas. Quanto às condições de carregamento, existem três principais tipos de ensaio de caracterização da aderência: ensaios de arranque direto/corte (*shear test*), ensaios de arranque em flexão (*bending test*) e ensaios de tração (*tensile test*).

Nos ensaios de arranque direto, os provetes de betão podem variar no número de faces reforçadas com o laminado de FRP e no número de faces ensaiadas simultaneamente. Desta forma, distinguem-se os ensaios de corte duplo, quando reforçadas e ensaiadas em simultâneo duas faces do provete (*double shear test*), dos ensaios em que apenas uma face do provete reforçado é ensaiada (*single shear test*). Para além disso, também diferentes configurações de carregamento do provete de betão podem ser encontradas na bibliografia, podendo este estar sujeito a tensões de compressão ou tensões de tração, enquanto o laminado é tracionado no decorrer do ensaio.

Por sua vez, nos ensaios de arranque em flexão, o laminado não é diretamente tracionado. No entanto, fica sujeito a tensões de tração devido à ação do momento fletor no provete de betão. Neste esquema, dois prismas são ligados através de dois pontos, um deles na parte inferior, através do elemento de reforço, e um ponto de ligação superior através de uma rótula.

Relativamente aos ensaios de tração direta, estes são usados para obter diretamente a resistência à tração. Contudo, em termos de esforços de corte e momentos fletores, torna-se mais complicado analisar as características da ligação do sistema betão-FRP (Nakaba *et al.*, 2001).

Na Figura 2.7 apresentam-se, de forma esquemática, algumas das configurações de ensaio mais utilizadas.

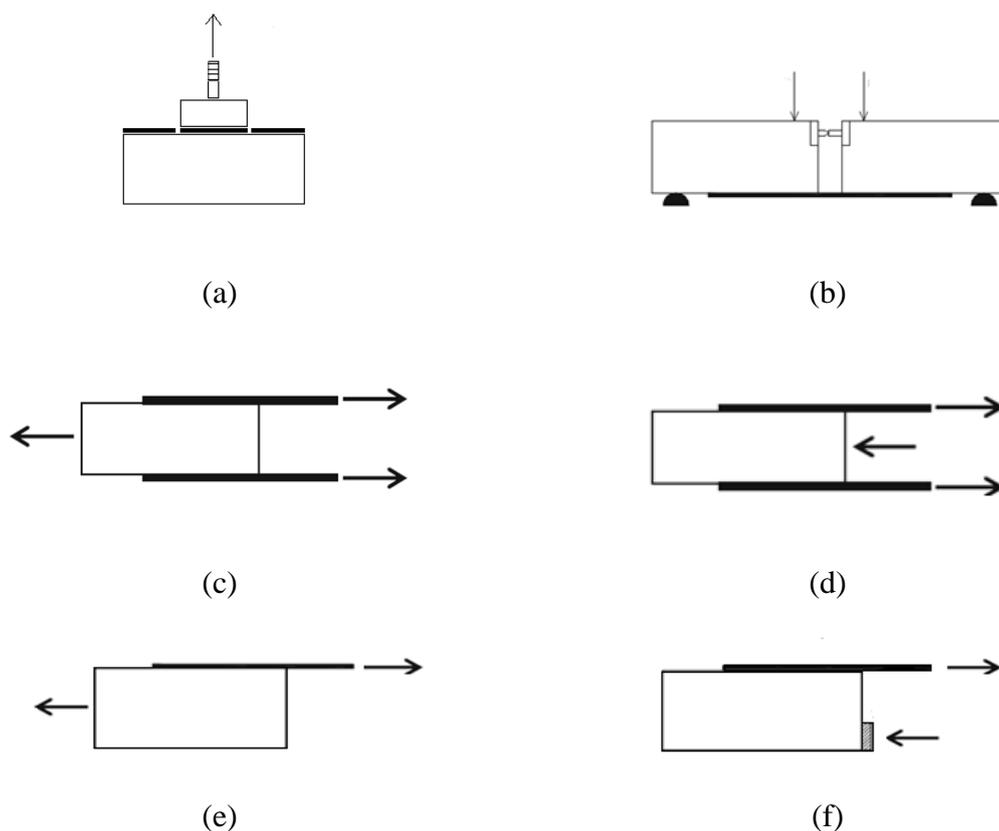


Figura 2.7 - Diferentes configurações de ensaios de aderência em provetes de betão reforçados com FRP, de acordo com a técnica EBR: (a) ensaio de tração direta (*Direct tensile test*); (b) ensaio de arranque em flexão (*Bending test*); (c) ensaio de arranque direto duplo com provete de betão tracionado (*double-shear pull test*); (d) ensaio de arranque direto duplo com provete de betão comprimido (*double-shear push test*); (e) ensaio de arranque direto simples com provete de betão tracionado (*single-shear pull test*); (f) ensaio de arranque direto simples com provete de betão comprimido (*single-shear push test*). Adaptado de Mazzotti *et al.* (2016) e Nakaba *et al.* (2001).

Relativamente aos ensaios de arranque direto simples, são geralmente encontradas na bibliografia duas configurações distintas. A primeira trata-se de colocar o bloco de betão num plano vertical, tal como os exemplos ilustrado nas Figura 2.8 (a) e (b). Em Subramaniam *et al.* (2007) (ver Figura 2.8 (a)), o provete de betão foi fixo a um pórtico rígido e uma placa metálica foi colocada na face superior do provete, ficando este sujeito a tensões de compressão, enquanto o laminado é tracionado no decorrer do ensaio experimental. Por sua vez, em Bilotta *et al.* (2011) (ver Figura 2.8 (b)), o provete de betão foi fixo na sua base ao pórtico rígido, não existindo placa superior a comprimi-lo e encontrando-se este sujeito a tensões de tração no decorrer do ensaio. A segunda configuração de ensaio de arranque direto, consiste na colocação do bloco de betão num plano horizontal tal como a configuração de ensaio adotada por Iovinella

et al. (2013), ilustrada na Figura 2.8 (c). Em todas as configurações de ensaio apresentadas na Figura 2.8, foi permitido medir diretamente o deslizamento do laminado em relação ao betão na extremidade carregada (s_l - *load end slip*) e a força de arranque (F_l).

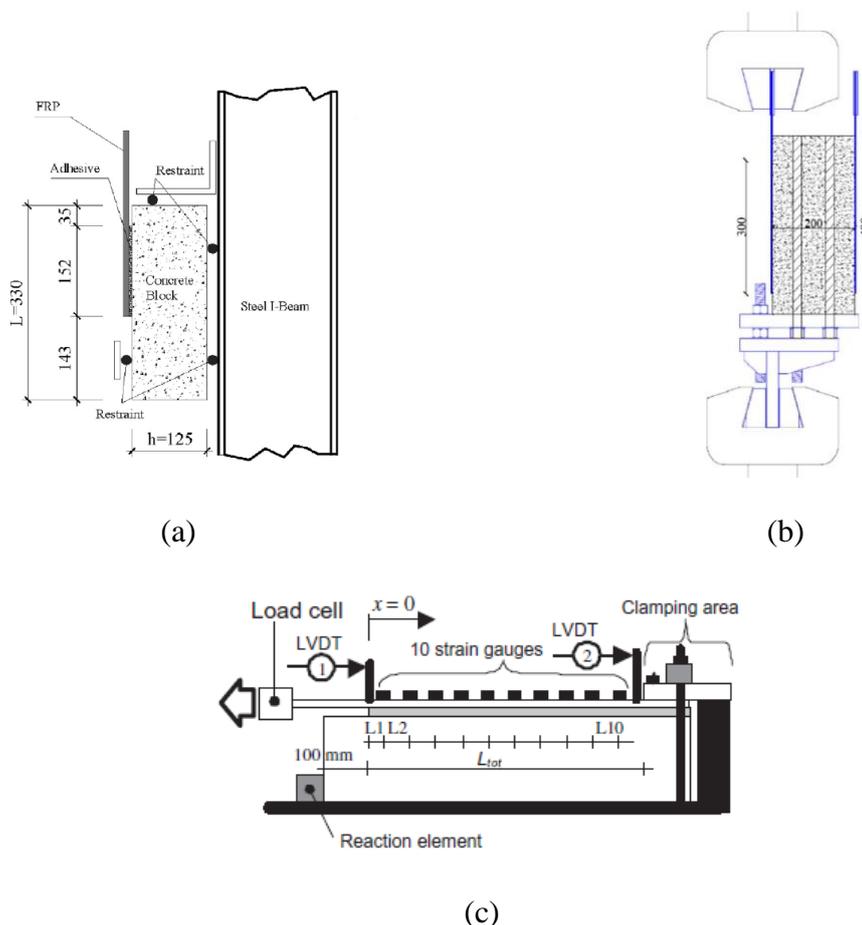


Figura 2.8 - Configurações de ensaio de arranque direto simples utilizados por: (a) Subramaniam *et al.* (2007); (b) Bilotta *et al.* (2011); (c) Iovinella *et al.* (2013). Nota: todas as dimensões estão em milímetros.

Processos de tratamento da superfície de betão para colagem externa do laminado de FRP

A rugosidade apresentada pela superfície do provete de betão, previamente à instalação do reforço, constitui um parâmetro importante que influencia diretamente o desempenho da ligação. Entende-se por tratamento de superfície, o processo adotado para remover a camada superficial de betão com características inapropriadas, permitindo que a superfície se encontre sã, limpa, com ausência da leitada de cimento e com a rugosidade adequada. Contudo, ainda

não existem códigos de projeto que explicitem as condições ótimas requeridas para a superfície de betão, nem formulações analíticas que preveem a resistência da ligação considerando esta variável. Várias têm sido as metodologias de tratamento de superfície utilizadas e estudadas, todas elas com reconhecidas vantagens e desvantagens. Entre os métodos mais utilizados, podem ser definidas três categorias principais: (i) remoção mecânica, podendo esta recorrer a sistemas manuais ou mecânicos, tais como as técnicas de picagem, utilização de escovas de aço, escurificação e esmeril. A remoção de betão por picagem recorre geralmente a martelos manuais, elétricos ou pneumáticos e a rugosidade obtida é essencialmente influenciada pela força exercida pelo martelo na superfície e pela dimensão e forma da ponteira deste. Por sua vez, a utilização de uma escova de aço, em geral acoplada a um berbequim elétrico, é uma técnica de simples aplicação, estando a rugosidade da superfície dependente da pressão exercida na mesma. A escurificação constitui outra técnica mecânica que consiste na remoção do betão recorrendo a eixos rotativos que incorporam rodas dentadas de corte e que vão desgastando progressivamente a camada superficial de betão. Frequentemente recorre-se a esmeril no tratamento da superfície de betão, utilizando uma mó de pedra até se tornarem visíveis os agregados; (ii) remoção por impacto de partículas (uma das técnicas mais comuns) que consiste na projeção de partículas de pequena dimensão contra a superfície, de forma a provocar abrasão e desagregação do material devido à elevada velocidade de projeção. Em geral recorre-se à utilização de jato de areia ou jato de granalha de aço, permitindo uma rápida preparação da superfície e a obtenção de uma rugosidade uniforme; (iii) jato de água, consiste na projeção de água sob elevada pressão contra a superfície de betão de modo a provocar a sua desagregação. É uma técnica rápida de aplicar e que se traduz numa rugosidade uniforme da superfície. A pressão adotada para o jato de água, o tipo de ponteira e a distância entre esta e a superfície influencia o nível de rugosidade obtido (Santos e Júlio).

Parâmetros que influenciam o comportamento da ligação

O comportamento da ligação entre o laminado e a superfície de betão, quando aplicada a técnica EBR, é influenciado por inúmeros parâmetros que têm vindo a ser estudados pela comunidade científica com o objetivo de conhecer e perceber quais os fatores que podem influenciar a qualidade do reforço e em que condições este deve ser realizado. Alguns dos parâmetros que têm vindo a ser analisados nos ensaios de caracterização da aderência são: (i) a influência da configuração de ensaio, (ii) a influência do tratamento de superfície de betão utilizado antes da

colagem externa do laminado, (iii) a influência do tipo de laminado incluindo propriedades físicas e geométricas, (iv) a influência das propriedades do betão e (v) a influência do comprimento de ancoragem entre o laminado e a superfície de betão.

Tal como já foi referido, até aos dias de hoje não existe ainda um procedimento de ensaio experimental padrão, tendo sido propostas várias configurações com distintas condições de carregamento e apoio (ver Figura 2.7). De acordo com resultados de estudos experimentais já realizados na caracterização da ligação entre o laminado e a superfície de betão, estes revelaram ser influenciados pela configuração de ensaio adotada.

Os ensaios de arranque direto, cujo provete de betão fica sujeito a tensões de tração ao longo do processo de carregamento do laminado (ver Figura 2.7 (c) e (e) e Figura 2.8 (b)), são mais representativos das condições de carregamento a que uma estrutura real ficaria sujeita, visto que nas estruturas existentes, o reforço externo é geralmente aplicado nas zonas tracionadas. Contudo, este esquema é mais difícil de ser realizado experimentalmente em relação ao esquema de ensaio de arranque direto, cujo provete de betão se encontra sujeito a tensões de compressão (ver Figura 2.7 (d) e (f) e Figura 2.8 (a) e (c)). Além dessa desvantagem, esse esquema torna-se mais sensível a imperfeições geométricas, contribuindo para uma maior dispersão de resultados. Pelo contrário, nos ensaios de arranque direto cujo provete se encontra solicitado à compressão, torna-se mais simples a obtenção de previsões da resistência da ligação, isto se a área de betão comprimido não for muito extensa de modo a assegurar o desenvolvimento da rotura na interface entre o laminado de FRP e a superfície de betão. Se esta fosse excessivamente extensa, seria limitado o volume de betão envolvido no mecanismo de rotura e obter-se-iam menores valores de carga de rotura por destacamento do FRP devido à redução da energia de fratura (Mazzotti *et al.*, 2016).

Um aspeto importante de realçar, é a necessidade de existir uma especial atenção quando adotados esquemas de ensaio simétricos e quando o sistema de reforço é ensaiado em ambas as faces do provete de betão, simultaneamente, tal como foi ilustrado nos esquemas da Figura 2.7 (c) e (d) (Guadagnini *et al.*, 2012). Nestes, qualquer imperfeição pode causar flexões e torções adicionais e reduzir a carga de rotura por destacamento do laminado. Não obstante, assim que a rotura se inicia numa das faces, perde-se a simetria original e o alinhamento entre os eixos da

célula de ensaio e as superfícies da ligação, traduzindo-se em tensões adicionais com consequente redução da carga de rotura (Yao *et al.*, 2005).

Relativamente à adoção do esquema de ensaio vertical (ver Figura 2.8 (a) e (b)) ou horizontal (ver Figura 2.8 (c)) nos ensaios de arranque direto simples, vários autores já confirmaram experimentalmente e numericamente, que existem diferenças entre os valores de carga de rotura por destacamento do sistema de reforço, quando usada uma ou outra configuração, devido às condições de apoio serem diferentes. Geralmente, obtiveram-se maiores níveis de tensão no esquema vertical devido a deformações de flexão adicionais (Mazzotti *et al.*, 2016).

De acordo com Ueda e Dai (2005), observou-se que grande parte da dispersão de resultados obtidos experimentalmente, tal como a resistência da ligação, é devida às condições da superfície de betão e ao tipo de preparação efetuada, mesmo quando diferentes operadores e laboratórios utilizam o mesmo procedimento de tratamento de superfície.

Iovinella *et al.* (2013), realizaram uma alargada campanha experimental de ensaios de arranque direto, onde se analisou o efeito da rugosidade apresentada pela superfície de betão na resistência à rotura por destacamento do laminado. Para isso, diferentes tratamentos de superfície foram utilizados, seguindo-se a medição da respetiva rugosidade através de um sensor laser. Para além de se ter variado o tipo de preparação da superfície dos provetes, os autores adotaram dois tipos de betão com diferentes resistências, de modo a avaliar a sua influência na eficácia dos processos de tratamento superficial. O esquema de ensaio adotado foi já apresentado neste documento (ver Figura 2.8 (c)) e consistia num prisma de betão ($150 \times 200 \times 600 \text{ mm}^3$) reforçado numa das suas faces, fixo horizontalmente num pórtico rígido e com um elemento de reação em aço de 60 mm de altura colocado na sua zona frontal (extremidade carregada) de forma a impedir o deslocamento horizontal do provete, durante o ensaio. Os laminados de CFRP, foram colados a partir de uma distância igual a 100 mm da face do prisma e com 350 mm de comprimento ancorado. Uma placa de aço foi fixa na parte traseira do prisma de modo a impedir o deslizamento do laminado em relação ao betão, nessa zona. Os tratamentos de superfície utilizados na referida campanha experimental foram os seguintes: (i) utilização de uma escova de aço conectada a um disco rotativo (*Brushing*), (ii) tratamento com esmeril, recorrendo a uma mó de pedra até os agregados estarem visíveis (*Grinding*),

(iii) utilização de uma ponteira em aço para aplicar múltiplos impactos na superfície de betão (*Bush-hammering*) e (iv) tratamento com jato de areia (*Sand blasting*).

Sendo I_R o parâmetro que traduz a rugosidade da superfície, é apresentado na Figura 2.9 o resultado das medições realizadas com o sensor laser, nas superfícies que foram sujeitas a tratamento. Na mesma figura, os mesmos resultados são comparados com os obtidos nas medições da rugosidade da superfície dos provetes de referência (sem qualquer tratamento superficial). Os resultados demonstraram, claramente, uma maior eficácia do uso de jato de areia seguindo-se o tratamento por impacto através de uma ponteira metálica. Ambos os tratamentos permitiram, também, obter uma rugosidade mais uniforme na zona tratada.

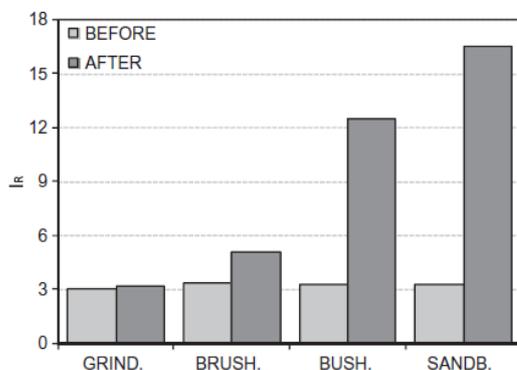


Figura 2.9 - Valores médios do parâmetro I_R para todos os provetes antes e depois do tratamento de superfície (Iovinella *et al.*, 2013).

Na Figura 2.10, são apresentados os resultados em termos de resposta força de arranque *versus* deslizamento na extremidade carregada, obtidos nos ensaios de arranque direto levados a cabo por Iovinella *et al.* (2013). Os autores concluíram que o método adotado para o tratamento da superfície influencia os valores de resistência da ligação obtidos. Quanto à rigidez do sistema, esta não foi muito influenciada pelo tipo de tratamento de superfície, visto que os ramos iniciais das curvas são praticamente coincidentes. O tratamento com jato de areia revelou ser o mais eficaz em termos de resistência à rotura por destacamento do laminado. Este permitiu que o processo de destacamento do sistema de reforço se tenha iniciado para valores de carga de arranque superiores relativamente aos restantes provetes onde foram utilizados outros métodos de tratamento de superfície. Relativamente à influência da utilização dos dois tipos de betão e, tal como é observável através da comparação das curvas das Figura 2.10 (a) e (b), os autores

concluíram que a eficiência do tratamento da superfície foi menor quando considerados substratos de betão com elevada resistência à compressão.

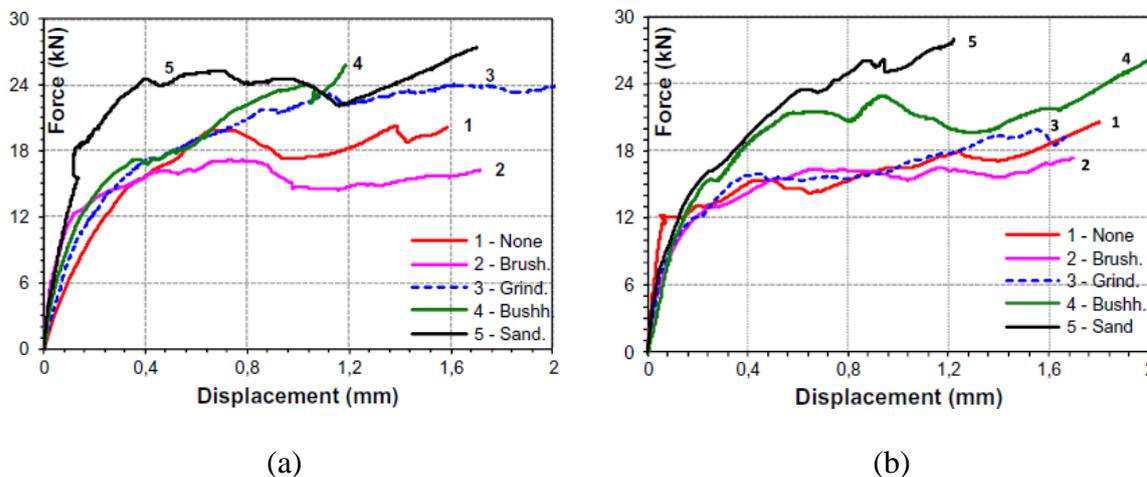


Figura 2.10 - Curvas força de arranque *versus* deslizamento na extremidade carregada obtidas nos provetes com diferentes tratamentos de superfície (Iovinella *et al.*, 2013): (a) betão com 15 MPa de resistência à compressão; (b) betão com 20 MPa de resistência à compressão.

Savoia *et al.* (2007), também investigaram o efeito de três diferentes metodologias de tratamento de superfície. Os autores recorreram a esmeril com recurso a dois tipos de mó, uma de pedra e outra de ferro grosso, e tratamento com jato de areia. Com esse intuito levaram a cabo um programa experimental num sistema de ensaio semelhante ao utilizado por Iovinella *et al.* (2013) (ver Figura 2.8 (c)), onde os provetes foram reforçados com laminados e mantas de CFRP. Os resultados demonstraram que quando a superfície de betão foi preparada com jato de areia, valores elevados de energia de fratura foram obtidos para menores valores de tensão de corte máxima e significativamente maiores deslizamentos. Com este mesmo tratamento de superfície, a força máxima no instante em que se iniciou o mecanismo de rotura por destacamento do sistema de reforço, aumentou em cerca de 20% e a lei de interface obtida exibiu um comportamento menos frágil no ramo de amolecimento. Relativamente à utilização de laminados ou mantas e comparando os seus resultados quando o mesmo tratamento de superfície (jato de areia) foi aplicado, as leis de interface foram bastante diferentes, mesmo que a energia de fratura obtida em ambos os casos tenha sido semelhante. Quando utilizado o laminado, a interface demonstrou ser três vezes mais rígida relativamente ao reforço com a manta de CFRP, apresentando um maior valor de tensão de corte máxima.

Toutanji e Ortiz (2001), efetuaram uma análise experimental da influência do tratamento da superfície de betão e do tipo de reforço FRP na resistência da ligação entre a manta e o betão. Os métodos de preparação da superfície utilizados antes da aplicação do reforço foram uma lixa comum e o jato de água. Os resultados dos ensaios de arranque direto duplo realizados evidenciaram que com a aplicação do jato de água, maiores foram os valores de carga de rotura obtidos.

Bilotta *et al.* (2011), realizaram um programa experimental de ensaios de arranque direto com o intuito de investigar o comportamento da ligação entre o laminado CFRP e a superfície de betão. A configuração de ensaio adotada, bem como as dimensões do provete foram as já ilustradas na Figura 2.8 (b). Um dos objetivos desta campanha experimental foi avaliar a influência da rigidez axial do laminado ($E_f \times A_f$), onde E_f representa o seu módulo de elasticidade e A_f a respetiva área da secção transversal. Para isso, foram utilizados laminados de carbono cuja rigidez variava entre 13650 kN e 30940 kN. O comprimento de ancoragem adotado foi de 300 mm e todas as superfícies de betão reforçadas foram tratadas recorrendo a séries de impactos por intermédio de uma ponteira metálica (*bush-hammering*). Os resultados demonstraram que até uma rigidez axial de 20000 kN, existe uma tendência crescente da força máxima de arranque registada no instante da rotura por destacamento do laminado, com o aumento da rigidez axial do mesmo. A partir desse valor o aumento da rigidez axial do laminado não contribuiu para o aumento da resistência da ligação.

Aiello e Leone (2008), estudaram os efeitos dos principais parâmetros que influenciam o desempenho da ligação entre o FRP e a superfície de betão. Deste modo, realizaram uma alargada investigação experimental com três esquemas de ensaios distintos, onde fatores como o tipo de reforço FRP, a preparação da superfície de betão, a resistência do betão e o comprimento de ancoragem adotado, foram estudados. Efetuaram-se ensaios de arranque em flexão, ensaios de arranque direto simples e ensaios de arranque direto duplo. Os provetes foram reforçados recorrendo a laminados CFRP de alta resistência, laminados CFRP de alto módulo de elasticidade ou laminados GFRP. Em alguns provetes foi aplicado tratamento de superfície com recurso a uma lixa abrasiva, enquanto outros foram reforçados sem que nenhum tratamento superficial tivesse sido aplicado. Foram utilizados três comprimentos de ancoragem distintos

(75, 100 e 150 mm) e três tipos de betão com diferente resistência à compressão. Os resultados demonstraram que a rigidez do reforço fez aumentar significativamente o desempenho da ligação em termos de força de arranque máxima, tensão média e comprimento de ligação envolvido na transferência de tensões. No que diz respeito ao deslizamento entre o FRP e a superfície de betão, verificou-se um aumento quando utilizados laminados de menor rigidez. Os autores também constataram a necessidade de se proceder a um tratamento superficial do betão para melhorar o comportamento da ligação. De facto, os resultados demonstraram que o comportamento da ligação foi melhorado quando efetuado um tratamento de superfície no provete de betão em termos de carga última e tipo de rotura (mesmo que este tenha sido efetuado com uma simples lixa abrasiva). Mais concretamente, o modo de rotura variava entre rotura do adesivo nos provetes sem tratamento, até rotura coesiva do betão nos provetes com tratamento superficial. A influência do tipo de configuração de ensaio utilizada foi também analisada. As tensões médias na ligação obtidas nos ensaios de arranque em flexão foram superiores às obtidas nos ensaios de arranque direto simples, confirmando a influência do esquema de ensaio utilizado no comportamento da ligação entre o laminado de FRP e o betão. Com a variação do comprimento de ancoragem, os autores confirmaram que, quando o comprimento de ancoragem adotado excedia o comprimento efetivo de transferência de tensões, não foi possível aumentar a máxima carga transferível.

2.3.2 Sistema NSM (*Near-surface mounted*)

A técnica de reforço NSM (*Near-Surface Mounted*) surgiu nos anos 2000 como uma alternativa à técnica EBR (*Externally bonded reinforced*). Neste sistema de reforço, os laminados (ou varões) de FRP, em vez de colados à superfície do elemento a reforçar, passaram a ser introduzidos em ranhuras pré-executadas no betão de recobrimento, com recurso a uma máquina de corte, previamente preenchidas com adesivo, contribuindo assim para o aumento da capacidade de carga dos elementos estruturais. Recuando algum tempo atrás, esta técnica já tinha sido utilizada na Europa no reforço de estruturas de betão armado, onde em ranhuras pré-executadas no betão de recobrimento se inseriam varões de aço e posteriormente se preenchia com argamassa de cimento (Asplund, 1949).

Comparativamente com a técnica EBR, a técnica NSM tem vindo a demonstrar inúmeras vantagens, tais como:

- (i) Exige menor quantidade de trabalho na aplicação, nomeadamente ao nível da preparação da superfície de betão para instalação do FRP, uma vez que a camada superficial, que não contém agregados e cujas propriedades são deficitárias, não necessita de ser removida;
- (ii) O nível de eficiência do sistema de reforço é superior, encontrando-se menos suscetível à ocorrência de rotura por destacamento do FRP;
- (iii) O reforço pode ser mais facilmente ancorado a membros adjacentes, o que previne a rotura prematura por destacamento do laminado de FRP. Este fator é muito importante, por exemplo, no reforço à flexão de elementos estruturais com ligações rígidas cujo momento máximo ocorre nas suas extremidades;
- (iv) O aspeto visual da estrutura não é alterado;
- (v) Maior facilidade na aplicação de pré-esforço;
- (vi) O reforço FRP encontra-se protegido pelo betão de recobrimento e, conseqüentemente, está menos exposto a danos mecânicos, impactos acidentais, atos de vandalismo e efeito do fogo;
- (vii) Torna possível a mobilização de esforços de corte antes e após ser atingida a força máxima, podendo ocorrer rotura pelo laminado de FRP.

Por todas estas vantagens, a técnica NSM pode ser considerada mais eficiente do que a EBR, podendo estas serem utilizadas simultaneamente, desde que a espessura do betão de recobrimento permita a abertura de entalhes adequados à sua aplicação (De Lorenzis e Teng, 2007).

Tipicamente, FRP's de fibra de vidro (GFRP) e de fibra de carbono (CFRP), são usados como material de reforço. Três diferentes secções transversais têm sido geralmente utilizadas: secção retangular, quadrada e circular. Como as ranhuras, onde é instalado o material de reforço, possuem lados verticais e paralelos, secções quadradas e retangulares exploram melhor essa geometria de entalhe, permitindo atingir uma espessura mais uniforme de adesivo. Além disso, quando são usados varões circulares, divisões no preenchimento de adesivo na ranhura podem ocorrer devido a tensões perpendiculares instaladas no FRP. Comparando a eficiência das secções transversais retangulares com as quadradas, as primeiras maximizam a superfície de contacto, minimizando as tensões na ligação para a mesma carga de tração aplicada no FRP.

Uma outra vantagem do recurso a secção retangular, está relacionada com a simplicidade de abertura da ranhura, onde apenas um corte com a serra é suficiente. Pelo contrário, quando utilizados varões circulares ou de secção quadrada, são necessários dois cortes seguidos de remoção do betão entre estes. Por sua vez, a desvantagem da utilização de secções retangulares no reforço, diz respeito à necessidade de se executarem ranhuras mais profundas para permitir a mesma área de reforço. Relativamente aos adesivos, recorre-se geralmente à utilização de adesivos epoxídicos (Coelho *et al.*, 2015).

Quando nesta técnica de reforço se recorre à utilização de laminados de CFRP, tal como na investigação experimental da presente dissertação, geralmente utilizam-se laminados com dimensões compreendidas entre 10 e 20 mm de largura e com espessura de 1.4 mm. Quanto às dimensões das ranhuras pré-executadas no betão de recobrimento, estas variam sensivelmente entre 15 e 25 mm em profundidade, enquanto em largura variam, geralmente, entre 3 e 5 mm.

2.3.2.1 Procedimento de aplicação

Em termos de aplicação, a técnica NSM envolve o seguinte procedimento:

- (i) Abrir as ranhuras no betão de recobrimento, recorrendo a uma máquina de corte adequada que proporcione precisão na sua geometria e evite danos quer no betão quer na armadura de reforço;
- (ii) Limpar as ranhuras com recurso a ar comprimido;
- (iii) Colocar elementos auxiliares para assegurar a correta aplicação do laminado CFRP no interior da ranhura;
- (iv) Limpar o laminado FRP com solvente apropriado, como por exemplo acetona;
- (v) Preparar o adesivo de acordo com as recomendações do fornecedor e com o especial cuidado no cumprimento do “*shelf-time*” e “*pot life*”, ambos os conceitos já explicados neste documento, quando descrito o procedimento de aplicação da técnica EBR;
- (vi) Preencher a ranhura e revestir o laminado de FRP com o adesivo;
- (vii) Inserir o laminado de CFRP na ranhura, pressionando-o lentamente de modo a que o adesivo flua entre o FRP e os bordos laterais do entalhe. Esta fase tem especial

importância para assegurar que as ranhuras pré-executadas fiquem completamente preenchidas por adesivo, pois, se não for o caso, pode ocorrer a formação de vazios;

- (viii) Remover adesivo em excesso, regularizando a superfície;
- (ix) Respeitar o tempo de cura do adesivo indicado pelo fornecedor, durante o qual a estrutura não deverá sofrer qualquer tipo de solicitação, tornando possível tirar todo o proveito do desempenho do sistema de reforço.

No Capítulo 3 do presente documento, onde o programa de ensaios realizado é apresentado, todos os referidos passos de aplicação do reforço segundo a técnica NSM serão devidamente ilustrados, visto que esta foi uma das técnicas utilizadas no trabalho de investigação desenvolvido.

2.3.2.2 Reforço à flexão

Quando a técnica NSM é utilizada no reforço à flexão, tem sido comum a adoção de varões (circulares ou quadrados) ou laminados de secção retangular. Na Figura 2.11, é apresentado um exemplo de uma viga de betão armado reforçada à flexão com esta técnica de reforço, quando laminados de FRP de secção retangular são utilizados.

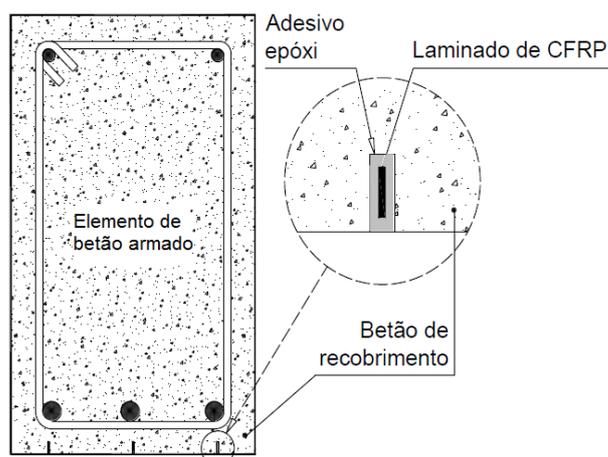


Figura 2.11 - Reforço à flexão de uma viga de betão armado de acordo com a técnica NSM, com recurso a laminados de CFRP de secção retangular. Adaptado de Sena-Cruz (2005).

Ao longo das últimas décadas, um número alargado de investigações experimentais tem sido realizado, maioritariamente em vigas e lajes de betão armado. O objetivo tem sido avaliar a eficiência da técnica NSM no reforço à flexão, bem como os fatores que mais influenciam o seu desempenho. De forma geral, os parâmetros mais estudados são: (i) a configuração de ensaio incluindo a geometria do elemento, do carregamento e a estaticidade do esquema; (ii) a taxa de reforço interno (varões de aço) utilizada; (iii) a taxa de reforço FRP adotado no reforço; (iv) diferentes tipos de FRP utilizado e diferentes geometrias de secção transversal; (v) diferentes tipos de adesivo, com diferentes propriedades resistentes; (vi) diferentes tipos de betão, com distintas propriedades resistentes; (vii) geometria das ranhuras onde se insere o reforço FRP; (viii) comprimento de ancoragem e (ix) espessura da camada de recobrimento do betão.

De facto, grande parte dos programas experimentais realizados pela comunidade científica demonstram uma influência significativa da quantidade de reforço CFRP adotado, da quantidade de reforço interno do elemento de betão armado (armaduras de reforço), do tipo de FRP utilizado e respetivo módulo de elasticidade na capacidade de carga dos elementos reforçados e nos níveis de utilização da capacidade resistente do reforço FRP. Em muitos estudos concluiu-se que o aumento da rigidez do FRP utilizado no reforço, traduz-se num aumento da carga última e numa diminuição da extensão experimentada por este aquando a rotura do laminado (Sena-Cruz *et al.*, 2016).

De Lorenzis *et al.* (2000), investigaram a eficácia do sistema de reforço NSM com recurso a varões de GFRP, em ensaios à flexão de vigas de betão armado com secção transversal em forma de “T”. Os autores concluíram que a técnica NSM é uma técnica promissora no aumento da capacidade de flexão, pois verificaram um aumento de carga última nas vigas reforçadas, relativamente às vigas de referência (não reforçadas). Ainda neste trabalho, foi verificada a importância da ligação entre FRP e betão no desempenho da técnica, observando-se a influência do comprimento em que estes materiais estão ligados pelo adesivo.

Barros e Fortes (2005), estudaram a resposta à flexão de vigas reforçadas com um número variado de laminados de CFRP e diferentes percentagens de reforço interno equivalente (varões de aço). Na Figura 2.12 é apresentada a configuração do ensaio de flexão sob quatro pontos de

outro relativo a vigas reforçadas ao corte. No reforço à flexão, a influência da percentagem equivalente de reforço longitudinal foi avaliada, bem como a influência da distância entre as ranhuras onde o reforço foi instalado. Os autores concluíram que, no reforço à flexão, a técnica NSM foi mais eficiente do que a técnica EBR, mas, com o aumento da percentagem equivalente de reforço longitudinal (aço e CFRP homogeneizado em aço equivalente), a diferença entre a eficácia das duas técnicas de reforço foi cada vez menor. A extensão efetiva experimentada pelo CFRP sofreu uma diminuição com o aumento da percentagem equivalente de reforço longitudinal, bem como com a diminuição do espaçamento entre laminados consecutivos. Relativamente aos resultados das vigas reforçadas ao corte, a técnica NSM demonstrou ser a mais eficaz e com a vantagem de possuir maior facilidade de aplicação.

Teng *et al.* (2006), investigaram a influência do comprimento de ancoragem entre o laminado e o betão circundante quando aplicada a técnica NSM. Para isso, um total de cinco vigas de betão armado com comprimento de 3200 mm e secção transversal retangular (150×300 mm²), foram ensaiadas. Uma de entre as cinco vigas foi ensaiada sem aplicação de reforço FRP (viga de referência), enquanto as restantes foram reforçadas com comprimentos de ancoragem de 500, 1200, 1800 e 2900 mm. Os resultados demonstraram que as vigas reforçadas com menor comprimento de ligação não tiveram efeito de reforço nem em termos de carga última nem em termos de rigidez da viga. Quando adotados comprimentos médios de ligação (1200 mm e 1800 mm), foram registados aumentos na capacidade de carga. Nestas, a rotura por desagregação do betão desde a zona de corte em direção à zona de maior momento fletor foi verificada. Pelo contrário, na viga com maior comprimento de ancoragem, ocorreu rotura por destacamento do laminado, propagando-se desde a zona de máximo momento fletor até à zona de corte.

Bonaldo *et al.* (2007), apresentaram os resultados de um programa experimental composto por quinze ensaios à flexão sob quatro pontos de carga em faixas de laje reforçadas com a técnica NSM, onde se recorreu a laminados de CFRP. O esquema do ensaio utilizado está apresentado na Figura 2.14. O objetivo foi avaliar a influência que parâmetros como a distância transversal entre laminados, a percentagem de reforço equivalente e a resistência do betão têm no comportamento à flexão das faixas de laje. Para isso, três diferentes tipos de betão com diferentes classes de resistência foram utilizados (C12/16, C35/45, C50/60). As diferentes

configurações de reforço utilizadas no referido programa experimental, estão ilustradas na Figura 2.15.

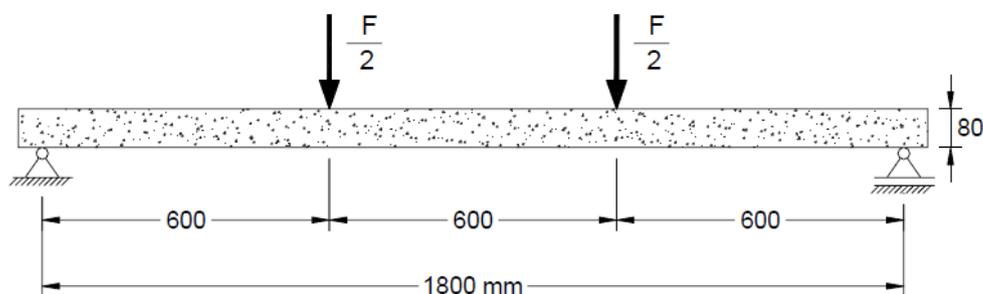


Figura 2.14 - Configuração do ensaio à flexão em faixas de laje (Bonaldo *et al.*, 2007). Nota: todas as dimensões estão em milímetros.

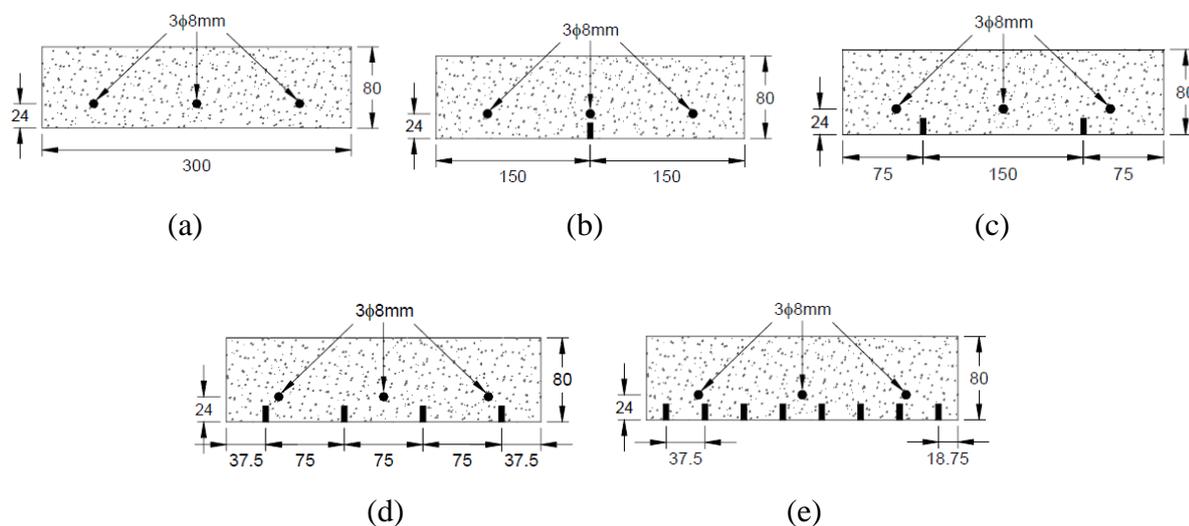


Figura 2.15 - Séries de ensaio com diferentes configurações de reforço (Bonaldo *et al.*, 2007): (a) série S0; (b) série S1; (c) série S2; (d) série S4; (e) série S8. Nota: todas as dimensões estão em milímetros.

Os resultados obtidos pelos autores demonstraram que, para as faixas de laje com betão C12/16, o incremento máximo em termos de capacidade de carga foi limitado pelo esmagamento do betão. No entanto, mesmo para esta classe de resistência de betão, lajes com percentagem equivalente de armadura longitudinal inferior a 0,90% (todas as séries estudadas), conseguiram aumentar a sua capacidade de carga em mais de 170% relativamente à laje de referência. Mesmo que, por razões económicas, uma percentagem equivalente de reforço CFRP de 0,13% não fosse excedido (séries S0, S1 e S2), incrementos de 87% na capacidade de carga foram observados,

o que já é bastante apreciável. Além disso, os resultados demonstraram que, mesmo para as lajes cuja classe resistente de betão era muito baixa, aumentos de 34%, 89% e 162% na carga de deflexão em estados limites de serviço, foram observados para percentagens equivalentes de reforço CFRP de 0,13%, 0,25% e 0,5% (séries S2, S4 e S8), respetivamente. Em termos de carga de cedência das armaduras longitudinais, foram observados aumentos de 26%, 59%, 131% e 197% para percentagens equivalentes de reforço CFRP de 0,06%, 0,13%, 0,25% e 0,5% (séries S1, S2, S4 e S8), respetivamente.

Em relação às lajes em que o betão constituinte tinha maior classe de resistência (C35/45 e C50/60), em geral, o máximo incremento de capacidade de carga foi limitado pela resistência à tração dos laminados de carbono. Para uma percentagem equivalente de reforço CFRP de 0,5% (série S8), aumentos na carga última de 338% e 335% foram registados para as lajes com classe de resistência C35/45 e C50/60, respetivamente. Com o betão C35/45, para percentagens equivalentes de reforço CFRP de 0,06%, 0,13%, 0,25% e 0,5% (séries S1, S2, S4 e S8), obtiveram-se aumentos de carga de serviço em 25%, 37%, 82% e 139%, respetivamente, enquanto para a classe de betão C50/60 os aumentos foram de 23%, 29%, 66% e 124%. Em termos de carga de cedência das armaduras longitudinais, e para as mesmas percentagens equivalentes de reforço CFRP, obtiveram-se aumentos de 31%, 45%, 157% e 190% para a classe de betão C35/45 e de 35%, 62%, 180% e 238% para a classe de betão C50/60.

Em termos de padrão de fendilhação, observações das lajes após os ensaios mostraram que a distância entre fendas diminui com o aumento da quantidade de reforço, independentemente da classe de resistência do betão adotado. Assim, para um certo nível de carregamento, a largura de fendas é tão mais baixa quanto maior a quantidade de reforço CFRP, resultando uma maior resistência ao aparecimento de fenómenos de corrosão na armadura interna.

Sharaky *et al.* (2014), estudaram experimentalmente o comportamento de vigas de betão armado reforçadas com a técnica NSM, recorrendo a varões de FRP. Um conjunto de oito vigas foram ensaiadas à flexão sob quatro pontos de carga e parâmetros como o tipo de material de reforço, as propriedades do adesivo, o tamanho e número de varões de FRP utilizados, foram analisados. Comparativamente com as vigas de referência (não reforçadas), os resultados demonstraram um aumento de 155,8% e 129,8% na carga de cedência das armaduras e um aumento de 166,3% e 159,4% na carga última, para as vigas reforçadas com varões de CFRP e

GFRP, respectivamente. As vigas reforçadas com varões de CFRP, também demonstraram maior rigidez do que as reforçadas com varões de GFRP. Quanto às propriedades do adesivo epóxi, o tamanho e o número de varões adotados, foram parâmetros que, neste estudo, não tiveram influência significativa na capacidade de carga das vigas reforçadas. Os autores puderam então concluir que a técnica NSM é eficaz no aumento da capacidade de carga e rigidez de vigas de betão armado e que a eficiência da técnica em termos de capacidade de carga depende principalmente da área dos varões de FRP, enquanto que o aumento da rigidez do sistema é principalmente influenciado pelo módulo de elasticidade dos mesmos.

2.3.2.3 Comportamento da ligação entre o laminado de FRP e a superfície de betão

A aderência do sistema traduz a capacidade que este possui em transferir tensões entre o betão e o reforço FRP, de modo a que seja possível desenvolver uma ação compósita de ambos os materiais durante o processo de carga do elemento estrutural (De Lorenzis *et al.*, 2001). Este é um fator crucial no bom desempenho do sistema de reforço, influenciando não só a capacidade de carga última do elemento reforçado, mas também o comportamento em serviço como o caso da abertura de fendas, a sua largura e espaçamento. A resistência da ligação do sistema NSM corresponde à máxima carga transferida e está diretamente relacionada com o tipo de rotura. Esta é influenciada por diversos fatores, tais como as propriedades dos materiais envolvidos, tipos de FRP e configuração da sua superfície, dimensões e nível de rugosidade da superfície das ranhuras, geometria do sistema de reforço utilizado (varões ou laminados/mantas), resistência à tração e ao corte do betão e do material de enchimento da ranhura, profundidade a que o reforço FRP é colocado no interior desta bem como o comprimento de ancoragem entre o material de reforço e betão (De Lorenzis e Teng, 2007; Sena-Cruz *et al.*, 2016).

Reconhecida a importância do estudo e da caracterização da aderência do sistema de reforço, tem sido densificada a realização de trabalhos ao nível experimental e analítico/numérico, por parte da comunidade científica. O objetivo tem sido analisar quais os parâmetros que mais influenciam o comportamento da ligação e quais as condições mais favoráveis para aplicação da técnica de reforço NSM.

Mecanismos de rotura

De acordo com Coelho *et al.* (2015), considerando um elemento de betão armado reforçado à flexão com recurso a materiais do tipo FRP, instalados de acordo com a técnica NSM, podem ocorrer seis modos de rotura, combinando diferentes estados de tensão nos três materiais constituintes (betão, armadura longitudinal e FRP).

Assumindo a rotura unicamente de um dos materiais, podem ocorrer três modos de rotura distintos: (i) esmagamento do betão, (ii) rotura do FRP e (iii) destacamento do FRP. O projeto de reforço deve evitar estes modos de rotura que originam roturas frágeis. O esmagamento do betão pode ocorrer quando a armadura de reforço longitudinal é excessiva e/ou a resistência do betão é baixa. Quando a taxa de reforço FRP aplicada é baixa e o comprimento de ancoragem é suficientemente extenso, pode ocorrer rotura do FRP. Por sua vez, se a configuração de reforço não permitir a completa mobilização da resistência do sistema FRP, o destacamento deste pode ocorrer mesmo antes da armadura entrar em cedência. No caso do sistema de reforço ser bem projetado, outros três modos de rotura são expectáveis: (i) esmagamento do betão acompanhado pela cedência da armadura, (ii) cedência da armadura acompanhada pela rotura do FRP ou (iii) cedência da armadura acompanhada pelo destacamento do sistema FRP. O equilíbrio interno da secção transversal é atingido entre o betão em compressão e a contribuição tanto da armadura longitudinal como do reforço FRP em tração. Deste modo, a solução mais eficiente a ser projetada será aquela que melhor explore os materiais de reforço (armadura longitudinal e FRP), conduzindo a uma rotura por esmagamento do betão após a armadura longitudinal entrar em cedência e estando o FRP, de forma segura, na iminência da rotura. Neste cenário, ocorre uma rotura dúctil, onde a capacidade de todos os materiais envolvidos é solicitada. Os dois modos de rotura restantes (cedência da armadura acompanhada pela rotura ou destacamento do FRP) são os mais difíceis de prever, devido ao facto dos modelos de previsão da resistência da ligação, ainda não serem suficientemente robustos, o que leva a existência de incertezas na definição do modo de rotura crítico (Coelho *et al.*, 2015).

Para melhor compreensão da rotura por destacamento do FRP, a Figura 2.16 ilustra um exemplo geral de uma viga de betão armado reforçada à flexão com a técnica NSM, onde são definidas as três zonas onde a rotura do sistema de reforço pode ocorrer.

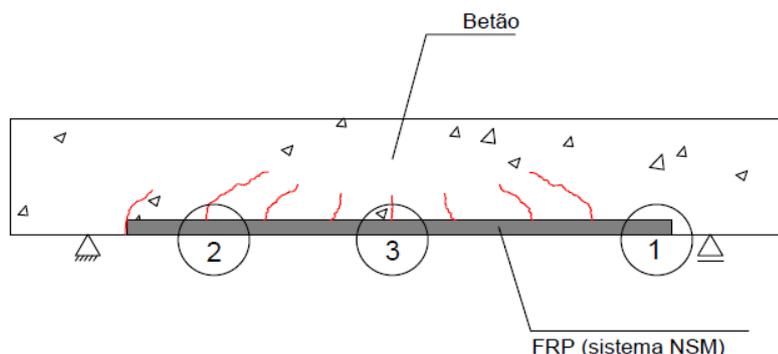


Figura 2.16 - Principais modos de rotura por descolamento numa viga reforçada à flexão com o sistema NSM CFRP.

De acordo com a figura anterior, o descolamento do sistema de reforço na zona de extremidade, (*End debonding* – zona 1 da figura), está associado a uma concentração de tensões próxima das extremidades do FRP, iniciando-se aí o processo de descolagem em direção ao centro da viga, ocorrendo a rotura do sistema. Por sua vez, o descolamento causado por fendas de corte diagonais (*Critical diagonal crack debonding* - zona 2 da figura), está associado ao desenvolvimento de uma fenda de corte dominante que, quando atinge o FRP, pode propagar-se horizontalmente ao longo do sistema de reforço, em direção à extremidade mais próxima, causando a rotura do sistema. Por último, o descolamento provocado por fendas de flexão (*Intermediate crack debonding* – zona 3 da figura), ocorre de forma muito semelhante à anterior, só que desta vez provocado por fendas de flexão.

De acordo com Coelho *et al.* (2015), cada um dos três modos de rotura da ligação referidos anteriormente, pode ocorrer devido a um de quatro modos de rotura locais diferentes, não apenas envolvendo os três materiais envolvidos no sistema (betão, FRP e adesivo), mas também podendo envolver as interfaces existentes (FRP/adesivo e adesivo/betão). Todos estes modos de rotura locais podem ser visualizados na Figura 2.17, onde se encontra apresentado um exemplo de reforço com técnica NSM recorrendo a um laminado de FRP. Para melhor compreensão destes modos de rotura, pode ser considerado que quando o elemento reforçado é sujeito a um carregamento, a carga vai sendo transferida desde o FRP até ao betão. Assim, é expectável que a primeira zona crítica onde a rotura pode ocorrer, seja a interface FRP/adesivo, a segunda zona crítica seja rotura do adesivo, a terceira seja a interface adesivo/betão e a quarta e última zona crítica seja a rotura coesiva do betão circundante.

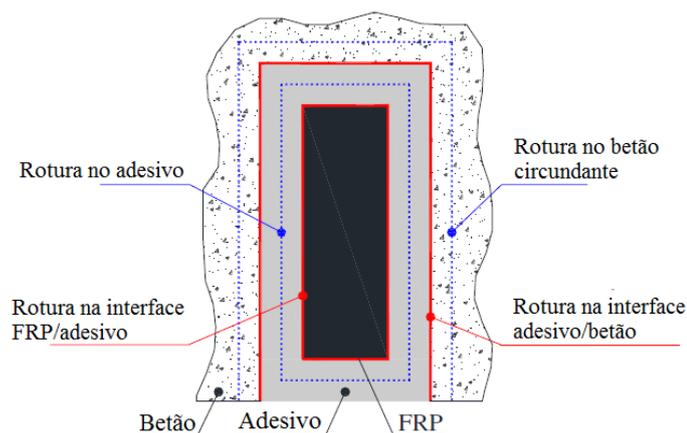


Figura 2.17 - Quatro possíveis modos de ruptura locais da ligação. Adaptado de Coelho *et al.* (2015).

- Ruptura na interface FRP/adesivo

A resistência relativa a este modo de ruptura depende essencialmente do nível de confinamento transversal, do comprimento de ligação e dos mecanismos de adesão entre FRP e adesivo. De acordo com De Lorenzis e Nanni (2002), uma ruptura na interface FRP/adesivo pode ser crítica quando se utilizam varões de superfície lisa ou com insuficiente jateamento de areia, o que faz com que a resistência da ligação dependa desde logo da adesão entre o varão de FRP e o adesivo. Este tipo de ruptura pode ser identificado visualmente quando após a sua ocorrência, não existe adesivo colado à superfície do varão.

- Ruptura do adesivo

Este modo de ruptura depende também do nível de confinamento transversal e das propriedades mecânicas do adesivo, principalmente da sua resistência ao corte. Este pode ser crítico quando utilizados laminados com superfície rugosa e é identificado visualmente quando após a ocorrência da ruptura existe adesivo colado ao laminado FRP e ao betão. Ocorre ruptura do adesivo quando a sua resistência à tração é atingida.

- Ruptura na interface adesivo/betão

A ruptura na interface entre o adesivo e o betão depende dos mesmos fatores que a ruptura na interface FRP/adesivo, com a diferença de que, neste caso, os mecanismos de adesão são entre o adesivo e o betão.

- Rotura coesiva no betão

Este modo de rotura depende também do nível de confinamento transversal, e das propriedades mecânicas do betão.

Configuração de ensaios de caracterização da aderência da ligação

Nas últimas décadas, têm sido propostas e utilizadas várias configurações de ensaio na avaliação do comportamento da ligação entre o reforço FRP e o substrato de betão. Tal como foi referido para a técnica EBR, um dos aspetos mais críticos relativamente à configuração de ensaio a adotar, é a inexistência de uma norma concreta e de um esquema de ensaio padrão na caracterização da aderência quando aplicados sistemas NSM FRP.

De entre as configurações propostas, as mais comuns são os ensaios de arranque direto/corte (*DPT-Direct Pullout Test*) e os ensaios de arranque em flexão (*BPT-Beam Pullout test*). Este último é reconhecido pela comunidade científica como o mais representativo do comportamento à flexão de elementos reforçados com a técnica NSM. Os ensaios de arranque direto são mais representativos das zonas de extremidade onde os elementos de reforço são ancorados ao elemento de betão. Várias têm sido as propostas de configurações de ensaio, de instrumentação e de geometria dos provetes de betão. Geralmente, nos ensaios de aderência, seja qual for a técnica de reforço, é monitorizada a força de arranque e os deslizamentos na extremidade carregada e livre da ligação. Para isto, recorrem-se a equipamentos de medição como transdutores de deslocamento, células de carga e extensómetros para monitorizar as extensões no laminado ao longo do seu comprimento de ancoragem.

De forma idêntica ao que foi referido para as configurações dos ensaios de aderência com a técnica de reforço EBR, neste caso também os ensaios de arranque direto podem variar em termos de número de faces ensaiadas e estado de tensão a que o provete de betão se encontra durante o ensaio. Mais concretamente, os ensaios de arranque direto podem ser de corte simples (*single-shear test*) ou duplos (*double-shear test*), se o número de faces reforçadas e ensaiadas ao mesmo tempo forem apenas uma ou duas, respetivamente. Quanto ao estado de tensão do provete de betão, tal como foi referido para a técnica EBR, este pode estar sujeito a tensões de

tração ou tensões de compressão. Na Figura 2.18, são ilustradas as principais configurações de ensaio de arranque direto quando utilizada a técnica NSM.

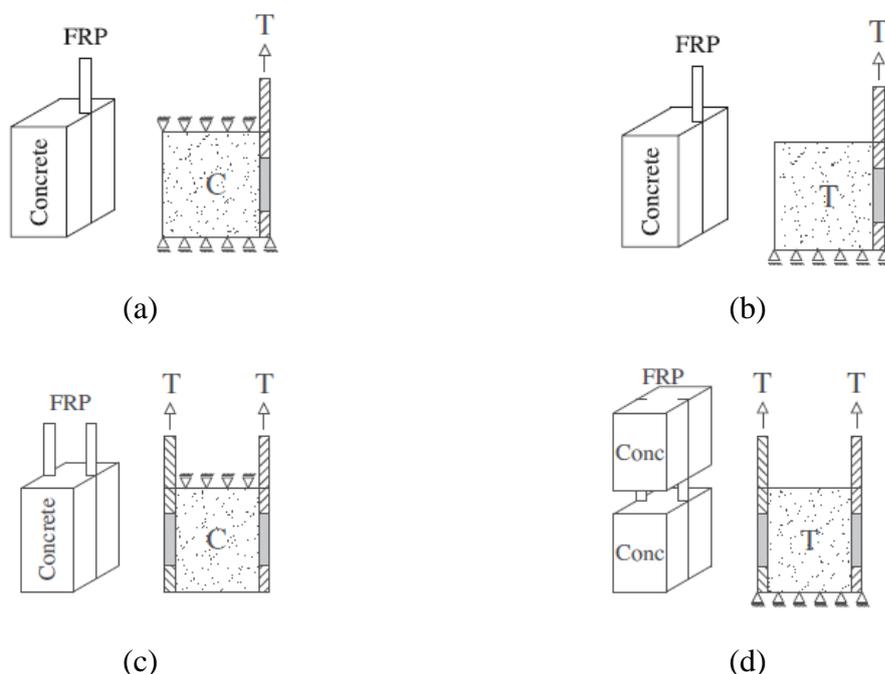


Figura 2.18 - Configurações de ensaio de arranque direto com a técnica NSM (Coelho *et al.*, 2015): (a) ensaio de arranque direto simples com provete de betão comprimido (*single-shear push test*); (b) ensaio de arranque direto simples com provete de betão tracionado (*single-shear pull test*); (c) ensaio de arranque direto duplo com provete de betão comprimido (*double-shear push test*); (d) ensaio de arranque direto duplo com provete de betão tracionado (*double-shear pull test*).

Em seguida, alguns exemplos de configurações de ensaio adotadas por investigadores são apresentados.

De Lorenzis *et al.* (2002), propuseram a seguinte configuração de ensaio de arranque direto, cujo provete tem a forma de “C” (ver Figura 2.19). Utilizando este tipo de configuração foi permitido medir diretamente o deslizamento do laminado na extremidade carregada (s_l - *load end slip*) e na extremidade livre (s_f - *free end slip*), assim como a força de arranque.

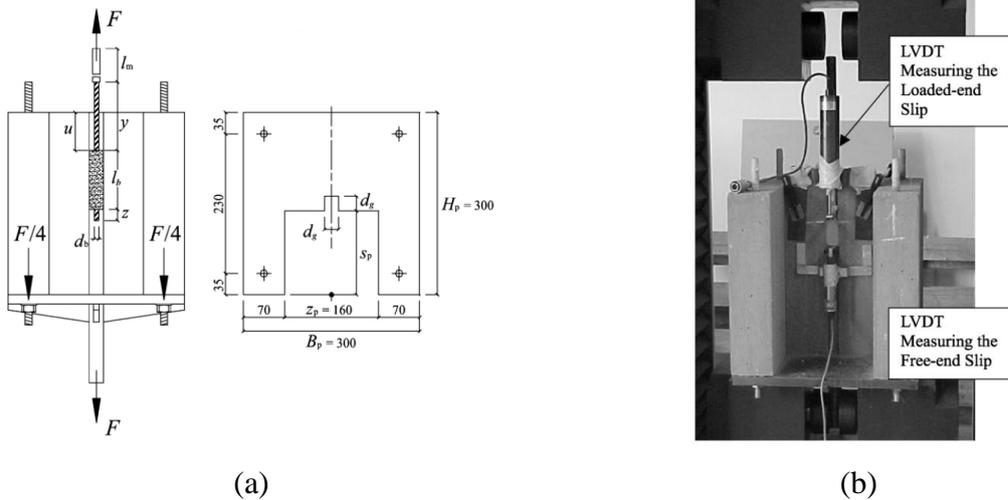


Figura 2.19 - Ensaio de arranque direto com provete em forma de “C” (De Lorenzis *et al.*, 2002): (a) esquema de ensaio; (b) foto do ensaio. Nota: todas as dimensões estão em milímetros.

Fernandes *et al.* (2012), utilizaram uma diferente configuração de ensaio de arranque direto, relativamente à apresentada anteriormente (ver Figura 2.20). Os provetes utilizados para analisar a ligação tinham geometria cúbica com 200 mm de aresta e a distância entre o início do comprimento de ancoragem até à face superior do provete de betão era de 100 mm, com o objetivo de evitar a rotura prematura do provete pela formação de uma cunha em cone de betão na extremidade carregada. Tal como na configuração apresentada anteriormente, esta também permitiu a medição do deslizamento na extremidade carregada e livre, embora nesta última com maior dificuldade.

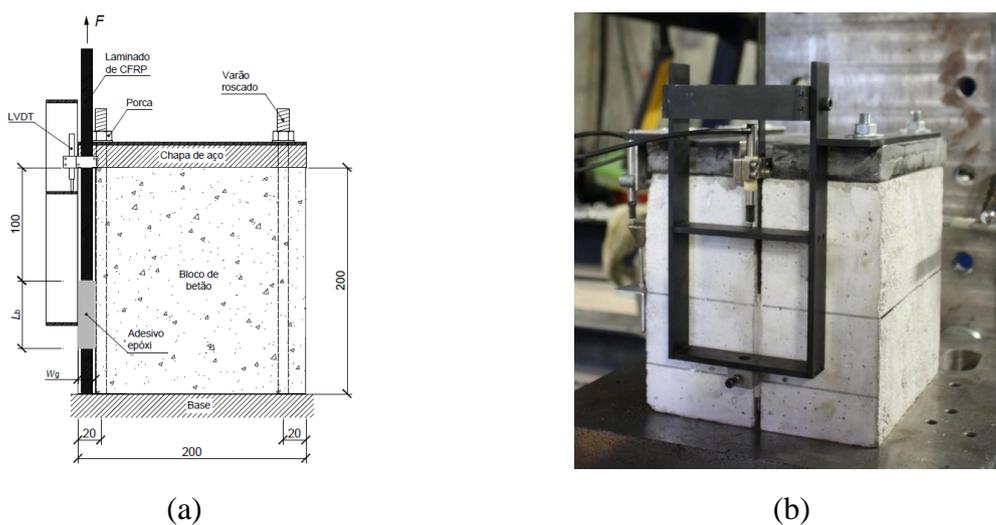


Figura 2.20 - Ensaio de arranque direto com provetes cúbicos (Fernandes *et al.*, 2012): (a) esquema do ensaio; (b) foto do ensaio. Nota: todas as dimensões estão em milímetros.

Cruz (2016), utilizou uma geometria de provete prismática ($150 \times 150 \times 600 \text{ mm}^2$) para estudar o comportamento de aderência quando se tratavam de comprimentos de ancoragem mais elevados (de 200 e 300 mm) (ver Figura 2.21). Na face lateral foi executada uma ranhura de 5 mm e 25 mm de largura e profundidade, respectivamente, para a colocação de um laminado de secção transversal de $20 \times 1.4 \text{ mm}^2$.

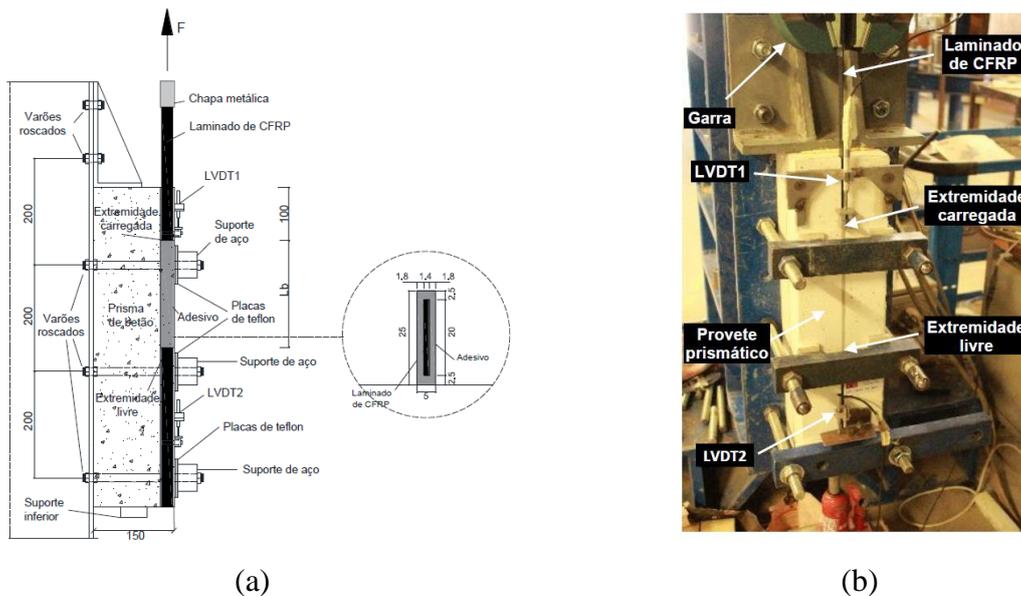


Figura 2.21 - Ensaio de arranque direto com provetes prismáticos (Cruz, 2016): (a) esquema do ensaio; (b) foto do ensaio. Nota: todas as dimensões estão em milímetros.

Relativamente aos ensaios de arranque em flexão, têm sido usadas, pela comunidade científica, duas configurações que diferem no uso de um ou dois blocos de betão ligados entre si através do elemento de reforço.

Caso se utilize apenas um bloco de betão (ver Figura 2.22), é colocada uma rótula metálica no topo do provete ensaiado e é executado um corte transversal a meio vão da face inferior, para que se forme uma fenda localizada no centro da viga. Quando esta se começa a propagar até à rótula, passam a existir dois blocos de betão separados, ligado apenas em dois pontos, na face superior pela rótula metálica e na face inferior pelo elemento de reforço. Desta forma, é possível isolar as forças de compressão e de tração e o momento fletor que estas geram, através do conhecimento da distância entre o centro da rótula e a posição do reforço FRP. Mesmo assim, nesta configuração, é recomendável a utilização de extensometria a fim de registar as extensões

instaladas no FRP pois, com a propagação da fenda, a resposta global do sistema pode ser afetada.

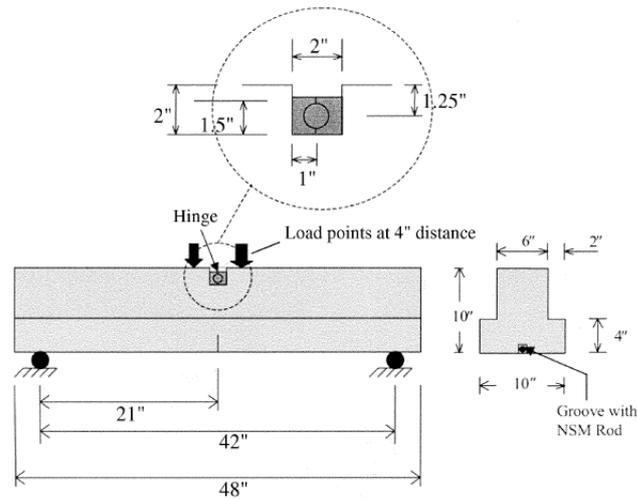


Figura 2.22 - Ensaio de arranque em flexão recorrendo a um bloco de betão (De Lorenzis e Nanni, 2002).
Nota: todas as dimensões estão em polegadas (1 polegada = 25.4 milímetros).

Caso se utilizem dois blocos de betão (ver Figura 2.23), estes ligam-se entre si através de dois pontos: na parte inferior pelo elemento de reforço colocado numa ranhura ao longo do eixo longitudinal da viga e na parte superior através de uma rótula. Nesta configuração de ensaio de arranque em flexão, a ligação é avaliada num dos blocos, onde se define o comprimento de ancoragem a analisar. No outro bloco o comprimento de ancoragem é muito elevado de modo a garantir que a rotura da ligação ocorra na zona onde o estudo é pretendido.

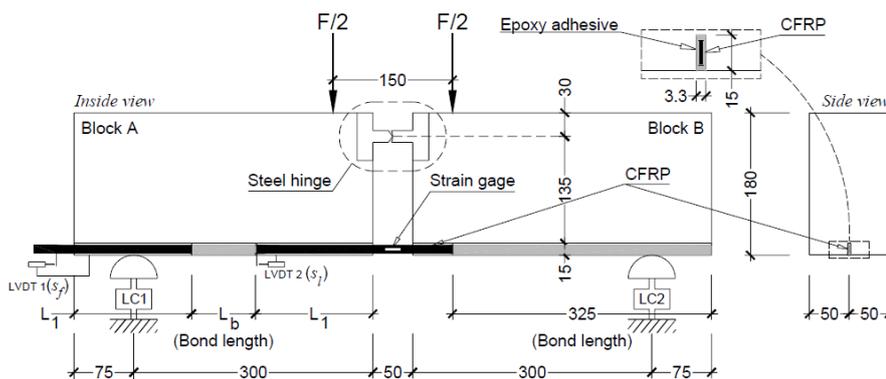


Figura 2.23 - Ensaio de arranque em flexão recorrendo a dois blocos de betão (Sena-Cruz, 2005). Nota: todas as dimensões estão em milímetros.

Parâmetros que influenciam o comportamento da ligação

De forma geral, os parâmetros que têm vindo a ser estudados e que são reconhecidos como sendo influentes no comportamento de aderência do sistema NSM FRP, são os seguintes: (i) tipo de configuração de ensaio, (ii) tipo de FRP e a respetiva superfície exterior, (iii) dimensões e níveis de rugosidade dos entalhes, (iv) geometria do sistema de reforço utilizado (laminados, mantas ou varões), (v) propriedades do betão, (vi) tipo de adesivo, (vii) profundidade a que o elemento de reforço é colocado no elemento de betão e (viii) comprimento ancoragem do sistema de reforço.

- Tipo de configuração de ensaio

Novidis e Pantazopoulou (2008b), efetuaram estudos experimentais e numéricos nos quais ficou demonstrado que diferentes configurações de ensaio podem influenciar significativamente os resultados experimentais.

De acordo com Coelho *et al.* (2015), comparando as diferentes configurações de ensaio de arranque direto, isto é, ensaios de arranque direto duplo (duas faces reforçadas são ensaiadas) com os ensaios de arranque direto simples (uma face reforçada é ensaiada), estes últimos apresentam vantagens na facilidade de preparação, no controlo do ensaio e na análise dos resultados obtidos. Por sua vez, se forem comparados os ensaios de arranque direto simples, cujo provete de betão se encontra sujeito a tensões de compressão, com aqueles em que o provete está sujeito a tensões de tração, é expectável que o valor da força máxima de arranque seja maior no primeiro caso por consequência das condições de apoio. É claro que estas conclusões só podem ser retiradas quando os diferentes ensaios são realizados nas mesmas condições, como o mesmo tipo de betão, de material de reforço, de adesivo, o mesmo comprimento de ancoragem e o mesmo comprimento livre entre a zona ancorada e a face do provete. Segundo o autor, se por sua vez forem comparados os ensaios de arranque direto (simples e duplo), com os ensaios de arranque em flexão, estes últimos requerem blocos de betão de dimensões superiores para estudar comprimentos de ligação maiores, o que torna esta configuração mais dispendiosa. De forma geral, os ensaios de arranque direto são mais representativos da rotura por destacamento do FRP na extremidade e roturas originadas por fendas de corte diagonais, enquanto que os ensaios de arranque em flexão são mais indicados para estudar a rotura por destacamento intermédio do FRP devido a fendas de flexão.

- Tipo de FRP e respetiva superfície externa

O tipo de FRP, mais concretamente, o tipo de fibra que o constitui e a sua rigidez, integra um parâmetro que influencia significativamente o comportamento de aderência do sistema de reforço. Ensaios de arranque direto com configurações semelhantes têm demonstrado que, quanto maior a rigidez do material de reforço, maior a força de arranque necessária para provocar a rotura da ligação.

Bilotta *et al.* (2011) e Palmieri *et al.* (2012), demonstraram essa influência, obtendo maiores forças de arranque quando o FRP era constituído por fibras de carbono relativamente aos constituídos por fibra de vidro, e de ambos em relação aos constituídos por fibras de basalto.

Bilotta *et al.* (2011), nos ensaios de arranque direto realizados, verificaram que a força máxima de arranque era tanto maior quanto mais elevada fosse a rigidez axial do FRP até um valor de 8000 kN, a partir do qual não se registou um aumento do valor da carga. Palmieri *et al.* (2012), também verificaram que quanto mais lisa fosse a superfície do material de reforço, maior a suscetibilidade a rotura na interface FRP/adetivo e maior a ductilidade na rotura comparativamente ao reforço que recorre a varões de FRP com superfícies mais rugosas.

- Geometria do FRP

Um outro fator que tem sido estudado e verificado como parâmetro influente do comportamento da ligação é a secção transversal do reforço FRP.

Costa e Barros (2011), realizaram ensaios de caracterização da aderência com recurso a ensaios de arranque direto e ensaios de arranque em flexão. Os autores concluíram que com o aumento da secção transversal do FRP, quer a força máxima de arranque obtida, quer as extensões experimentadas por este, aumentaram. Por outro lado, as tensões tangenciais ao nível da interface entre FRP e adesivo diminuíram devido à maior área de contacto entre o elemento de reforço e o adesivo.

Seracino *et al.* (2007), verificaram que os laminados de FRP de secção transversal retangular são mais eficientes relativamente aos varões de FRP com secção circular, devido ao facto de os primeiros terem a capacidade de experimentarem tensões mais elevadas, explorando melhor a

sua capacidade resistente. No mesmo estudo ficou também demonstrado que, com o aumento da largura do FRP de secção transversal retangular, mais elevadas as forças de arranque máximas obtidas.

- Superfície da ranhura onde o FRP é introduzido

O nível de rugosidade da ranhura constitui também um parâmetro influente no comportamento da ligação. Se estas forem executadas posteriormente à confeção dos elementos de betão, apresentam maior rugosidade do que as ranhuras pré-moldadas na betonagem. Estudos científicos revelam que quanto maior o nível de rugosidade da superfície da ranhura, melhor o comportamento de aderência (De Lorenzis *et al.*, 2002).

- Geometria da ranhura onde o FRP é introduzido

A geometria da ranhura onde o material de reforço é introduzido, constitui outro parâmetro que influencia o comportamento da ligação entre o material de reforço e o betão.

Kalupahana (2009), verificou que quando ambas as dimensões da ranhura (profundidade e largura), aumentavam na mesma proporção, a força de arranque máxima também aumentava. Al-Mahmoud *et al.* (2011), por sua vez, aumentou separadamente cada uma das dimensões da ranhura e os resultados demonstraram que o aumento da profundidade contribuiu para o aumento da força máxima de arranque obtida nos ensaios experimentais, devido ao maior confinamento que o betão circundante proporcionava ao FRP. Relativamente à largura da ranhura, o seu aumento traduziu-se em diminuições nos valores da força de arranque máxima.

Torna-se importante referir que tal como nos trabalhos experimentais referidos anteriormente, como noutros testes realizados no estudo do comportamento da ligação entre o reforço FRP e o betão, o aumento da profundidade da ranhura é benéfico, pois a rotura da interface ocorre para valores mais elevados de força de arranque. Contudo, quando utilizada a técnica NSM no reforço à flexão de elementos de betão armado, com o aumento da profundidade da ranhura e da respetiva posição do laminado, surgem mais parâmetros que influenciam a eficiência do reforço. Torna-se claro que com o aumento da profundidade da ranhura, maior seria o confinamento que o betão circundante provocaria no material de reforço, mas também seria menor a distância entre a força de compressão resultante das tensões de compressão no betão e

a força de tração resultante das tensões de tração no material de reforço, devido à maior profundidade a que este era instalado.

- Resistência do betão

Tal como já foi referido quando abordado o comportamento da ligação entre FRP e betão com a técnica EBR, no sistema NSM também a resistência do material do elemento reforçado se traduz num parâmetro influente do comportamento de aderência do sistema. Estudos demonstram que, com o aumento da resistência à compressão do betão, mais elevada é a força máxima de arranque obtida nos ensaios de arranque direto, até um certo limite. Mais concretamente, desde que a rotura ocorra no betão, o aumento da sua resistência à compressão influencia positivamente o comportamento da ligação. Contudo, quando o modo de rotura é diferente deste, os efeitos provocados pelo aumento da resistência à compressão do betão são negligenciáveis (Sena-Cruz, 2005; Seracino *et al.*, 2007).

- Comprimento de ancoragem

A influência do comprimento da ligação entre o material de reforço e o betão tem sido um dos parâmetros mais analisados pelos investigadores. Os estudos demonstram que o aumento do comprimento de ancoragem se traduz num aumento do valor da força de arranque capaz de provocar a rotura, assim como num aumento das extensões experimentadas pelo FRP. Para além disso, devido à maior superfície de contacto entre o FRP e os materiais envolventes e, devido à não uniformidade de distribuição de tensões ao longo do comprimento de ancoragem, menores são as tensões tangenciais médias ao nível das interfaces FRP/adetivo e adesivo/betão (Teng *et al.*, 2006; Novidis e Pantazopoulou, 2008a; Sena-Cruz, 2005).

2.3.3 Sistema EBR com recurso a laminados FRP pré-esforçados

Nos últimos anos, vários estudos em diferentes universidades de todo o mundo têm sido realizados com o objetivo de investigar a aplicação de sistemas de pré-esforço no reforço estrutural de elementos de betão armado, usando a técnica EBR com recurso a laminados de FRP. De forma geral, os trabalhos de investigação têm vindo a demonstrar que a utilização de laminados de FRP pré-esforçados conduz a uma maior capacidade de carga última, maior capacidade de carga no instante de abertura da primeira fenda e aquando a cedência de

armaduras de reforço interno, mas, especialmente, conduz a um melhoramento significativo do comportamento da estrutura em serviço.

Contudo, um decréscimo da ductilidade, resultante da diminuição da deformação quando a carga de rotura é atingida, tem sido verificado quando um nível de pré-esforço inicial é aplicado ao laminado. Em muitos casos, quando aplicado um nível de pré-esforço suficientemente alto, foi possível esgotar a capacidade resistente à tração do material de reforço, ao contrário do destacamento prematuro observado quando utilizado um laminado sem pré-esforço, colado externamente à superfície.

Na Figura 2.24, é apresentada, de forma esquemática, a relação momento *versus* curvatura para os casos de um elemento de betão armado sem reforço, para um elemento reforçado com laminado sem pré-esforço e para um elemento reforçado com recurso a um laminado pré-esforçado, bem como os respetivos modos de rotura expectáveis.

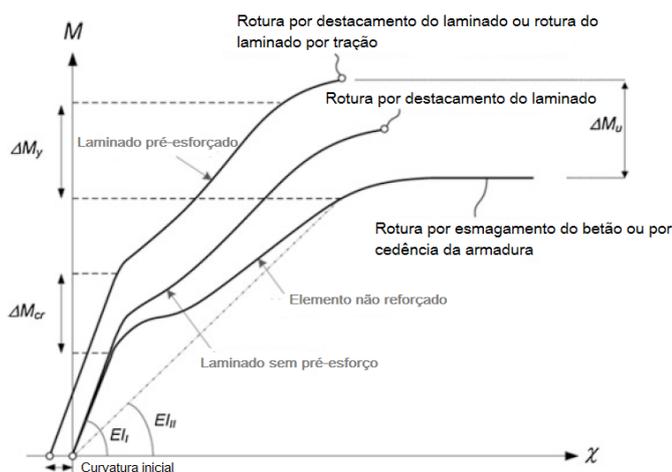


Figura 2.24 - Relação momento *versus* curvatura de um elemento de betão armado não reforçado, de um elemento de betão armado reforçado com um laminado de FRP sem pré-esforço e de um elemento de betão armado reforçado com um laminado de FRP pré-esforçado. Adaptado de Michels *et al.* (2016).

Com a análise do esquema anteriormente apresentado, verifica-se um aumento do valor da carga de início de fendilhação e de cedência da armadura, bem como um aumento da capacidade de carga última, quando se passa de um elemento de betão armado não reforçado para um elemento de betão armado reforçado com recurso a laminado sem pré-esforço e com pré-esforço, respetivamente. Além disso, é observado um comportamento menos dúctil dos sistemas

reforçados, principalmente do que recorre a pré-esforço, relativamente ao elemento não reforçado.

Vários têm sido os sistemas propostos para a aplicação de pré-esforço no laminado de FRP. Tal como é apresentado na Figura 2.25, estes podem ser divididos em três categorias principais: (i) a primeira consiste na aplicação de uma contra-flecha inicial no sentido oposto ao que as cargas permanentes atuam, com recurso a macacos hidráulicos. Posteriormente, o laminado de FRP é aplicado e devido à relaxação da deformação inicial, a estrutura é pré-tensionada; (ii) a segunda categoria consiste na utilização de uma estrutura externa que suporte o equipamento para a aplicação do pré-esforço; (iii) a terceira categoria, e a mais utilizada, consiste na aplicação de pré-esforço contra a própria estrutura.

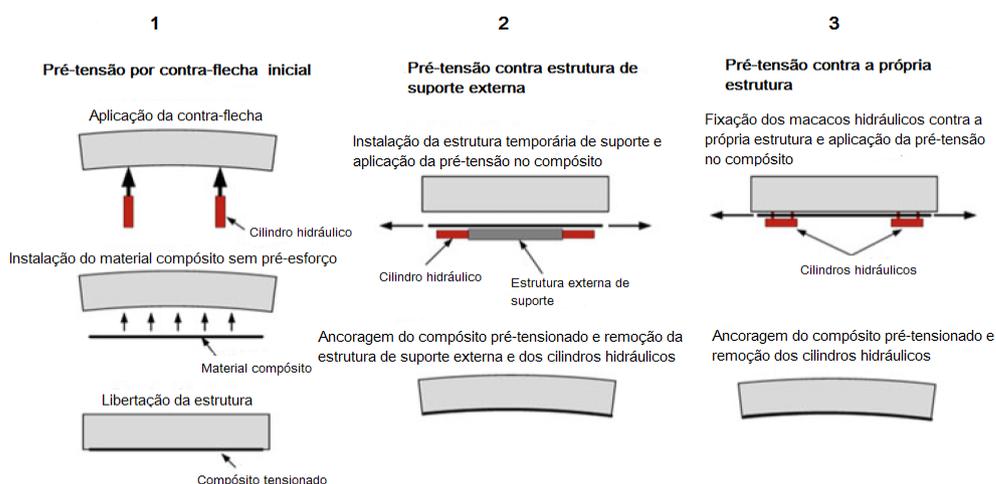


Figura 2.25 - Diferentes sistemas de pré-esforço. Adaptado de El-Hacha *et al.* (2001).

Todas as vantagens na utilização de sistemas pré-esforçados dependem muito dos sistemas de ancoragens especiais utilizados nas extremidades do elemento FRP pré-esforçado. Estes sistemas são requeridos e são responsáveis por transferir tensões de corte elevadas desde o elemento de reforço até ao betão, com o objetivo de evitar a rotura prematura do material compósito. Correntemente, vários sistemas de ancoragem e de pré-esforço de laminados de CFRP estão disponíveis no mercado. No âmbito desta dissertação serão abordados dois desses sistemas, nomeadamente o sistema de ancoragem mecânico (MA) e o sistema de ancoragem pelo método do gradiente de temperatura (GA).

2.3.3.1 Sistema de ancoragem mecânico (MA)

A aplicação de pré-esforço no reforço externo, contra a própria estrutura (terceira categoria apresentada na Figura 2.25), requer geralmente uma ancoragem metálica nas extremidades do laminado, sendo o pré-esforço aplicado com recurso a um macaco hidráulico instalado num caixilho metálico fixo através de vários aparafusamentos. O laminado é agarrado a um sistema de fixação móvel, e puxado em direção às suas extremidades, aplicando-se, deste modo, o pré-esforço.

Procedimento de aplicação

As diferentes etapas de aplicação do sistema mecânico de ancoragem (ver Figura 2.26) são as seguintes:

- (i) Preparação da superfície com remoção da camada superficial de cimento para obter uma adequada rugosidade até os agregados ficarem minimamente expostos. No final desta etapa recorre-se a ar comprimido para deixar a superfície limpa;
- (ii) Abertura dos furos e instalação dos varões roscados onde se vão fixar as chapas de ancoragem e as guias metálicas. A localização dos furos é previamente marcada no elemento a pré-esforçar;
- (iii) As unidades de fixação são introduzidas entre as guias em cada uma das extremidades e o laminado de FRP é cortado com o comprimento pretendido após ter sido limpo com acetona. O adesivo epóxi é também preparado segundo as recomendações do fornecedor e aplicado na superfície do laminado;
- (iv) O laminado é inserido no elemento a ser reforçado entre as unidades de fixação, e ligeiramente pressionado contra a superfície de betão;
- (v) O laminado é fixo com o fecho da unidade de fixação;
- (vi) A chapa metálica de ancoragem é instalada;
- (vii) Colocação do dispositivo metálico;
- (viii) Instalação dos cilindros hidráulicos no dispositivo metálico em ambas as extremidades;
- (ix) Aplicação do nível de pré-esforço pré-definido, com recurso a uma bomba hidráulica.

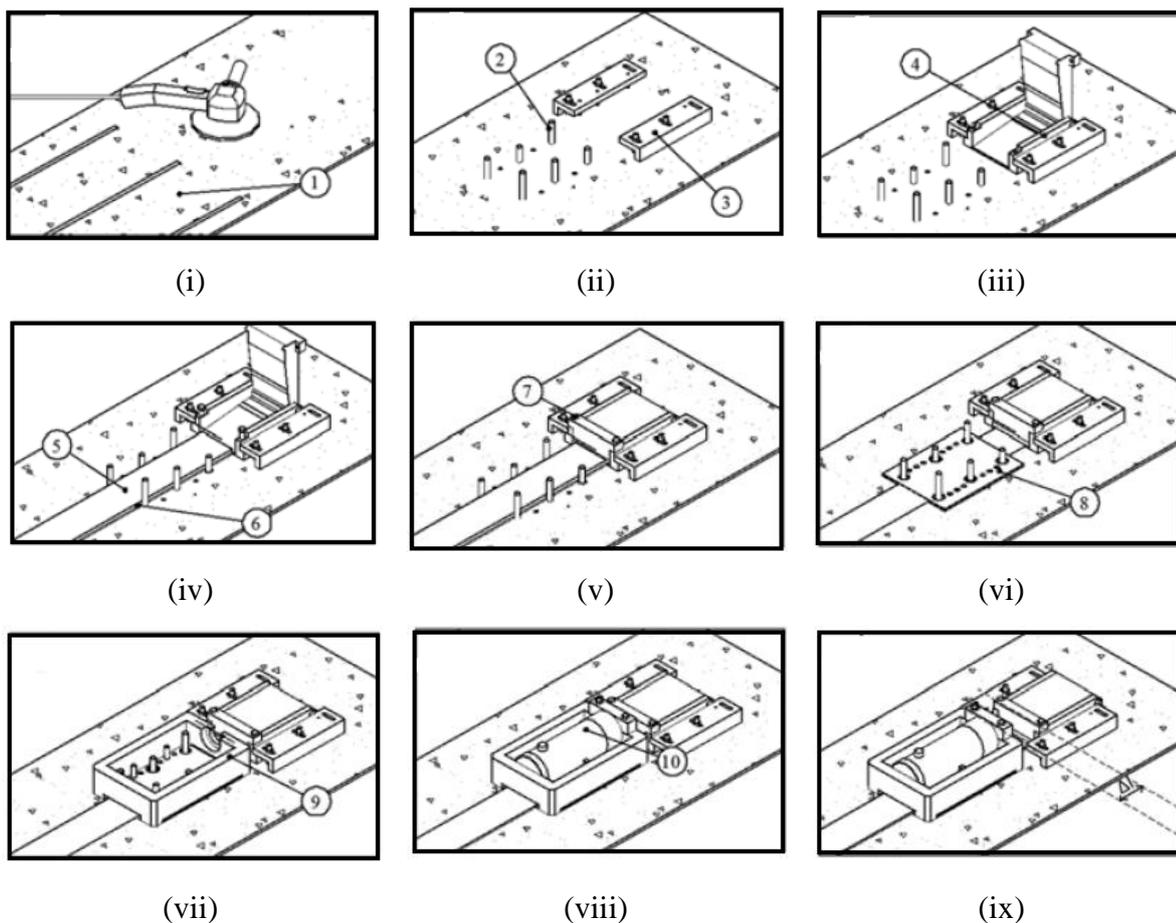


Figura 2.26 - Procedimento de aplicação do sistema mecânico de ancoragem (MA) (Michels *et al.*, 2016): 1 - superfície de betão tratada; 2 - varões roscados; 3 - guias metálicas; 4 - unidade de fixação; 5 - laminado de FRP; 6 - adesivo epóxi; 7 - unidade de fixação fechada; 8 - chapa metálica de ancoragem; 9 - dispositivo metálico; 10 - cilindro hidráulico.

Para controlar o nível de pré-esforço aplicado, podem ser colados extensómetros no laminado. Após a aplicação do pré-esforço, é necessário aguardar 24 horas que assegurem a mínima cura do adesivo epóxi e que implique que a força de pré-esforço nas extremidades seja totalmente libertada. Posteriormente, procede-se à remoção das componentes que constituem o sistema de ancoragem, como as guias, as unidades de fixação, caixilhos de alumínio e corte de parafusos temporários (Michels *et al.*, 2016).

2.3.3.2 Sistema de ancoragem pelo método do gradiente de temperatura (GA)

O princípio do sistema de ancoragem pelo método do gradiente baseia-se na propriedade do adesivo sofrer uma cura acelerada quando sujeito a altas temperaturas, criando-se uma ancoragem não mecânica composta simplesmente pelo laminado de FRP, a superfície de betão e a camada de adesivo epóxi da sua ligação (Michels *et al.*, 2013). Na Figura 2.27 é ilustrado o funcionamento deste sistema de ancoragem.

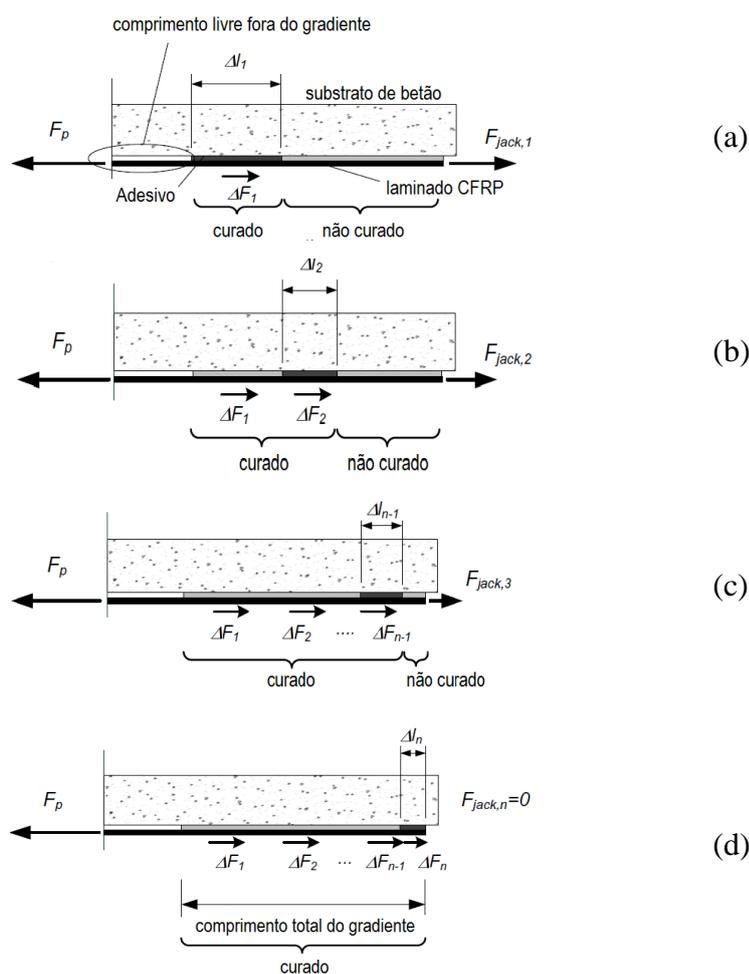


Figura 2.27 - Representação esquemática do princípio de funcionamento do sistema de ancoragem pelo método do gradiente de temperatura (GA). Adaptado de Michels *et al.* (2013).

Como foi demonstrado no esquema anterior, o sistema de ancoragem pelo método do gradiente prevê uma gradual redução da força de pré-tensão em ambas as extremidades do laminado ao longo de um comprimento definido " Δl ". Esse comprimento é sujeito a temperaturas elevadas com o objetivo de limitar as tensões de corte que surgem na zona de ancoragem, distribuindo,

dessa forma, a força total de pré-esforço. Consequentemente é evitada a rotura prematura do sistema que, provavelmente, ocorreria se forças de pré-tensão demasiado altas fossem transferidas do laminado para a superfície de betão nas extremidades. Depois de um primeiro segmento de adesivo com o comprimento “ Δl_i ” ter sido curado a altas temperaturas, num definido período de tempo, a sua resistência foi suficientemente desenvolvida para suportar uma porção “ ΔF_i ” da força total de pré-esforço aplicada “ F_p ”, que será posteriormente libertada. Nesta fase, a restante força no cilindro hidráulico seria igual a “ $F_p - \Delta F_i$ ”. Este procedimento é iterativamente repetido, em ambas as extremidades do sistema, até ser atingida uma força de pré-esforço nula. Na Figura 2.28 é apresentado este processo de transferência de força de pré-tensão.

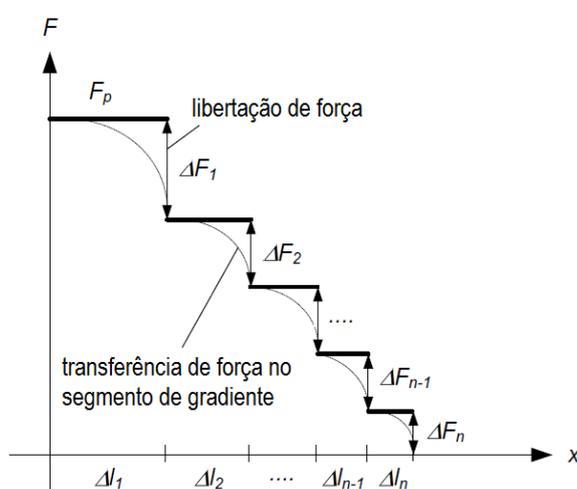


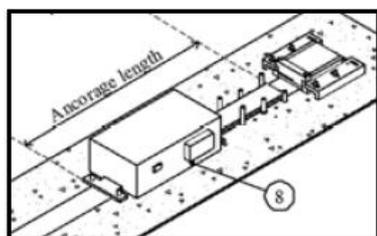
Figura 2.28 - Transferência da força nos diferentes segmentos sujeitos ao gradiente de temperatura. Adaptado de Michels *et al.* (2013).

Procedimento de aplicação

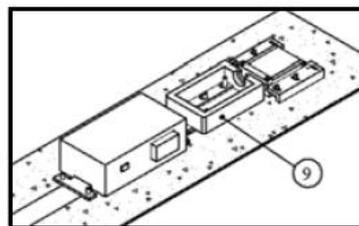
Sendo as cinco primeiras etapas de aplicação do sistema de ancoragem pelo método do gradiente de temperatura (GA) coincidentes com as do sistema de ancoragem mecânico (MA) (ver etapas de (i) a (v) ilustradas na Figura 2.26), são apresentadas em seguida (ver Figura 2.29) as restantes etapas que diferem do sistema de ancoragem anterior:

- (vi) O dispositivo eletrónico de aquecimento é instalado;
- (vii) Colocação do dispositivo metálico;

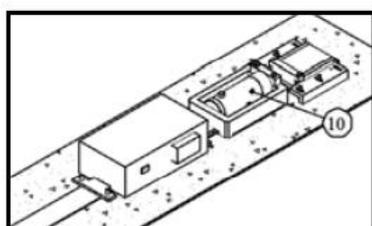
- (viii) Instalação dos cilindros hidráulicos no dispositivo metálico em ambas as extremidades;
- (ix) Aplicação do nível de pré-esforço pré-definido com recurso a uma bomba hidráulica.



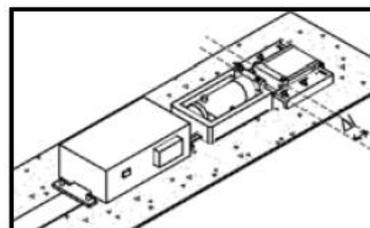
(vi)



(vii)



(viii)



(ix)

Figura 2.29 - Procedimento de aplicação do sistema de ancoragem pelo método do gradiente de temperatura (GA) (Michels *et al.*, 2016): 8 - dispositivo eletrónico de aquecimento; 9 - dispositivo metálico; 10 - cilindro hidráulico.

Após a instalação de todos os componentes, pode ser iniciado o processo de pré-esforço. Os cilindros hidráulicos são usados, simultaneamente, em ambas as extremidades de modo a proporcionar a força necessária para o alongamento do laminado. A força pode ser aumentada gradualmente até ser atingido o valor de pré-extensão desejado. Para aplicações laboratoriais, são geralmente usados extensómetros para controlar a extensão do laminado na fase de pré-tensão. Por vezes, esse controlo é também complementado com inspeções visuais nas quais se efetuam medições do aumento de comprimento entre dois pontos pré-definidos no laminado e na superfície de betão. Quando o nível de pré-extensão desejado é atingido, são fechadas as válvulas e inicia-se o processo de aquecimento no primeiro segmento da ligação, durante um determinado intervalo de tempo. Assim, a primeira fração da força total de pré-esforço, “ ΔF_1 ”, é libertada pela abertura das válvulas e introduzida no betão através do segmento de adesivo epóxi curado. Este processo é repetido até a totalidade da força de pré-tensão aplicada estar completamente distribuída na zona de ancoragem. Depois deste processo, todas as componentes

mecânicas temporárias são removidas, tornando a ligação apenas constituída por betão, epóxi e laminado de FRP, sem qualquer parafuso ou chapa, o que faz com que esta técnica de ancoragem não mecânica seja esteticamente vantajosa. O sistema de ancoragem referido também apresenta outras vantagens, tais como a facilidade e rapidez de aplicação, reduzindo assim custos de mão-de-obra. Incluindo todas as fases de instalação e desmontagem do sistema, o intervalo de tempo necessário é de aproximadamente 4 horas que, comparativamente ao sistema de ancoragem mecânico, é um intervalo de tempo muito mais curto, visto que neste seria necessário aguardar entre 1 a 2 dias, para ocorrer a cura total do adesivo epóxi a temperatura ambiente, antes do sistema estar pronto a ser utilizado (Michels *et al.*, 2013).

2.3.3.3 Estudos realizados na aplicação do sistema EBR com recurso a laminados de FRP pré-esforçados em elementos de betão armado

Nos últimos anos, tem sido densificado o estudo realizado na análise e avaliação deste sistema de reforço que recorre à utilização de laminados de FRP pré-esforçados. De forma geral, nos trabalhos experimentais já efetuados, reconheceram-se as seguintes vantagens na utilização desta técnica de reforço: (i) redução das deformações, (ii) redução da largura de fendas e da distância entre estas, (iii) melhor exploração dos materiais envolvidos no sistema estrutural (betão, aço e laminado de FRP), com destaque para a possibilidade de o FRP experimentar maiores extensões podendo até atingir a respetiva resistência à tração e reduzindo o risco de destacamento prematuro, (iv) maior resistência à flexão, corte e fadiga, (v) aumento da carga de início de fendilhação, carga de cedência da armadura e carga última, (vi) possibilidade de compensação de perdas de pré-esforço interno e capacidade de contrariar as cargas permanentes que atuam no elemento estrutural (Kim *et al.*, 2008; Mukherjee e Rai, 2009; Kotynia *et al.*, 2010; El Maaddawy e Soudki, 2008; Reza Aram *et al.*, 2008; Fernandes *et al.*, 2013; Czaderski e Motavalli, 2007).

Michels *et al.* (2013), avaliaram o desempenho do sistema de ancoragem GA, no reforço com a técnica EBR que recorre a laminados pré-esforçados. Análises ao material de reforço, após a aplicação deste sistema de ancoragem, revelaram que o laminado de FRP se manteve sem qualquer dano durante e após o processo de aquecimento, apresentando uma resistência à tração semelhante à verificada anteriormente a este. Também foi verificado que, pouco depois do

processo de cura acelerado, o adesivo epóxi apresentou uma rigidez inferior em relação à que possuiria se fosse curado a temperatura ambiente. Este facto pode ser visto como uma vantagem pois, com essa perda temporária de módulo de elasticidade, registou-se uma atenuação das tensões de corte na região do gradiente. A perda de resistência à tração após a aplicação do aquecimento não se torna importante, visto que a cura do adesivo é suficientemente avançada para suportar as tensões de corte. Ensaaios estáticos realizados em vigas reforçadas com esta técnica de reforço, demonstraram o aumento da carga última e da carga de início de fendilhação proporcionado pelo pré-esforço do laminado de FRP.

Pellegrino e Modena (2009), utilizaram ancoragens mecânicas no reforço de vigas de betão armado com recurso a laminados de CFRP pré-esforçados. Foram ensaiadas um conjunto de cinco vigas à escala real, com comprimento total de 10 m e secção transversal retangular de $300 \times 500 \text{ mm}^2$. Laminados de fibra de carbono unidireccionais com secção transversal retangular de $80 \times 1.2 \text{ mm}^2$, foram utilizados. A Figura 2.30, apresenta as curvas força *versus* deslocamento a meio vão, obtidas nos ensaios de flexão até à rotura. A viga denominada “RC-C”, corresponde à viga de referência. As vigas “RC-N” e “RC-EA” correspondem às vigas reforçadas com a técnica EBR sem qualquer sistema de ancoragem e com o sistema de ancoragem nas extremidades, respetivamente. Por sua vez, as vigas denominadas por “RC-PrEA” e “PrRC-PrEA” correspondem à viga reforçada de acordo com a técnica EBR com recurso a laminados de CFRP pré-esforçados e à viga que para além do laminado pré-esforçado também contempla cabos internos pré-esforçados, respetivamente.

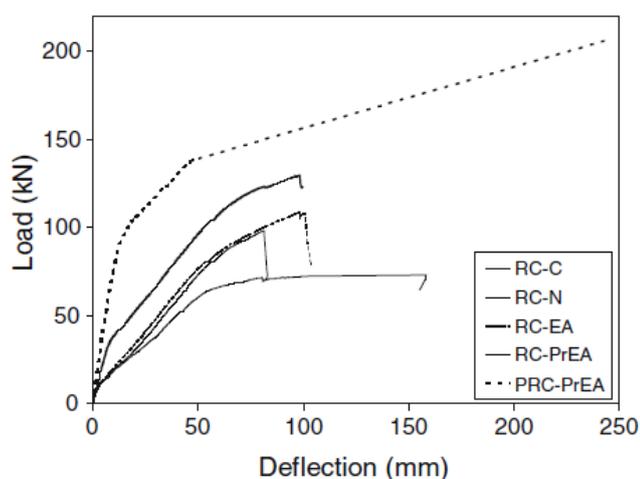


Figura 2.30 - Resposta das faixas de laje em termos de força *versus* deslocamento a meio vão (Pellegrino e Modena, 2009).

Com a análise dos resultados obtidos no trabalho experimental, os autores concluíram que:

- A viga de referência exibiu um comportamento à flexão típico de uma viga de betão armado, onde se distinguiram as fases de comportamento linear elástico até ao início da abertura de fendas, de pós-fendilhação e de pós-cedência das armaduras longitudinais;
- A viga RC-N (sistema EBR CFRP sem ancoragens nas extremidades), como seria expectável, demonstrou um comportamento frágil devido ao destacamento prematuro e sem aviso prévio do sistema de reforço;
- A viga RC-EA (sistema EBR CFRP com ancoragens nas extremidades) demonstrou um comportamento semelhante à viga anterior, mas atingiu um valor de carga última mais elevado, devido à presença das ancoragens nas extremidades. Neste caso, a rotura ocorreu por destacamento intermédio do laminado de CFRP, com rotura dos dispositivos de ancoragem nas extremidades;
- A rotura das vigas RC-PrEA (sistema EBR CFRP com laminado pré-esforçado) e PrRC-PrEA (viga com pré-esforço interno e laminado de CFRP pré-esforçado), ocorreu também por destacamento do laminado, mas o pré-esforço aliado ao sistema de ancoragem permitiu retardar a rotura completa. Tornou-se evidente o aumento da carga última e da carga correspondente ao início de fendilhação, quando utilizados laminados pré-esforçados em relação à viga de referência;
- Os dispositivos mecânicos de ancoragem aumentaram a capacidade de carga última do elemento estrutural, retardando a rotura por destacamento do laminado. O sistema de reforço com laminados de CFRP pré-esforçados, permitiu aumentar a capacidade de carga da viga no instante de abertura das primeiras fendas. A amplitude das fendas foi também reduzida e a sua distribuição passou a ser mais uniforme. Além disso, o laminado de CFRP foi capaz de experimentar extensões mais elevadas, o que significa que foi utilizado de forma mais eficiente, atingindo valores muito próximos da sua extensão última.

Correia *et al.* (2015), com o objetivo de contribuir para o conhecimento do comportamento à flexão de lajes de betão armado reforçadas com laminados de CFRP pré-esforçados, levaram a cabo um trabalho experimental, onde se analisou o desempenho dos sistemas de ancoragem

mecânico (MA) e ancoragem pelo método do gradiente (GA). Adicionalmente, a influência de parâmetros como o nível de pré-tensão aplicado, a largura e espessura do laminado utilizado bem como a técnica de preparação da superfície de betão, foi analisada. As lajes tinham um comprimento total de 2600 mm e secção transversal retangular de $600 \times 120 \text{ mm}^2$. O programa experimental foi constituído por um conjunto de 12 lajes divididas em duas séries, de acordo com a técnica de preparação de superfície utilizada. Na série S1 utilizou-se um tratamento com recurso a esmeril e na série S2 utilizou-se jato de areia. Todas as lajes foram ensaiadas até à rotura em ensaios de flexão sob quatro pontos de carga. Três lajes foram utilizadas como referência (sem sistema de reforço) e em cada uma das séries, uma laje foi reforçada com o sistema EBR CFRP sem aplicação de pré-esforço. As restantes sete faixas de laje foram reforçadas de acordo com a técnica EBR, recorrendo a laminados pré-esforçados cuja secção transversal podia ser de $50 \times 1.4 \text{ mm}^2$, $50 \times 1.2 \text{ mm}^2$ ou $80 \times 1.4 \text{ mm}^2$. Por sua vez, como já referido, o sistema de ancoragem utilizado foi o sistema mecânico (MA) ou o sistema de ancoragem pelo método do gradiente (GA).

As respostas das faixas de laje em termos de força *versus* deslocamento a meio vão, obtidas em cada uma das séries de ensaio, são apresentadas na Figura 2.31.

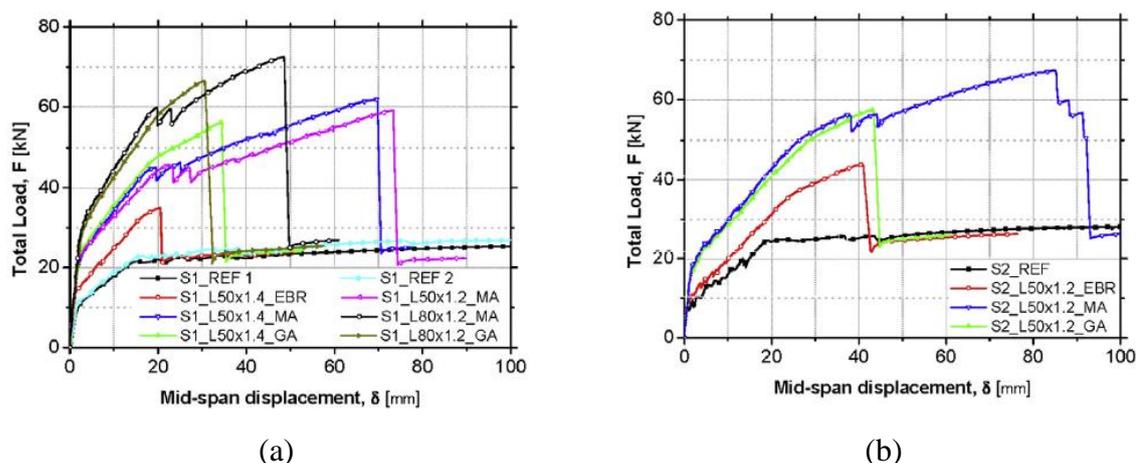


Figura 2.31 - Resposta das faixas de laje em termos de força *versus* deslocamento a meio vão (Correia *et al.*, 2015): (a) série S1; (b) série S2.

De acordo com os resultados obtidos no trabalho experimental, os autores concluíram os seguintes aspetos, em termos de comportamento em serviço:

- O reforço permitiu aumentar a rigidez do elemento de betão armado e, conseqüentemente, as deformações obtidas foram menores. A utilização de pré-esforço

não alterou significativamente a rigidez na fase elástica da resposta, mas retardou o início de fendilhação e cedência da armadura, relativamente às lajes que não recorreram a pré-esforço do laminado de CFRP. Ambos os sistemas de ancoragem utilizados conduziram a desempenhos semelhantes até ao início do processo de fendilhação e cedência da armadura;

- Os resultados também revelaram que, para um mesmo nível de carregamento, as lajes reforçadas exibiram menor largura de fendas e menor espaçamento entre estas, quando comparadas com as lajes de referência. Estas observações ainda foram mais evidentes quando se recorreu a pré-esforço, onde ambos os sistemas de ancoragem utilizados (MA e GA) conduziram a resultados idênticos;
- Foi observada uma influência considerável da largura do laminado no comportamento global do elemento reforçado. Quando comparados os resultados obtidos aplicando o laminado com secção transversal de $80 \times 1.2 \text{ mm}^2$ com o sistema de ancoragem mecânica, relativamente ao de secção de $50 \times 1.2 \text{ mm}^2$ com o mesmo sistema de ancoragem, observou-se um aumento da capacidade de carga última, de início de fendilhação e de cedência da armadura longitudinal em 23%, 26% e 31%, respetivamente. Contudo não se obteve uma influência destacável da espessura do laminado de CFRP utilizado no reforço;
- Como seria expectável, a utilização de laminados de CFRP pré-esforçados, no reforço à flexão das faixas de laje de betão armado, permitiu melhorar o seu comportamento global em termos de capacidade de carga, rigidez, retardo do início de fendilhação e cedência da armadura.

Relativamente ao comportamento em estado limite último, os autores concluíram que:

- O recurso ao pré-esforço do laminado aumentou a capacidade de carga última entre 60% e 107% na série S1, e entre 30% e 53% na série S2, relativamente às lajes de referência;
- No que respeita ao desempenho dos diferentes sistemas de ancoragem utilizados, até ao instante de início de cedência da armadura, estes apresentaram um comportamento similar. A partir desse instante, os resultados revelaram que as ancoragens metálicas do sistema mecânico (MA) preveniram a rotura prematura por destacamento do laminado, proporcionando uma maior capacidade de carga e maiores deformações, como pode ser observado na Figura 2.31. Assim, os autores verificaram um melhor comportamento do

sistema mecânico de ancoragem (MA) relativamente ao sistema do gradiente de temperatura (GA), visto que em termos de capacidade de carga última, o primeiro conduziu a valores superiores (entre 9% a 16%) relativamente ao segundo sistema;

- Uma melhor utilização da resistência à tração do laminado de CFRP foi permitida com a aplicação do pré-esforço. Em termos médios, a extensão última do laminado aumentou cerca de 132% e 74% quando aplicada a pré-tensão, nas series S1 e S2, respetivamente. O sistema de ancoragem MA conduziu a um melhor aproveitamento da capacidade resistente do laminado relativamente ao sistema de ancoragem GA, atingindo uma extensão última entre 13% e 28% superior;
- O tratamento com jato de areia, permitiu à superfície obter um maior nível de rugosidade relativamente ao tratamento com esmeril. Consequentemente, o comportamento de aderência foi melhorado, resultando num aumento da carga última registada e permitindo ao laminado de CFRP experimentar extensões mais elevadas.

2.4 Simulações numéricas

2.4.1 Conceitos introdutórios

O método dos elementos finitos (MEF) é uma poderosa ferramenta computacional que pode ser usada na simulação do comportamento de estruturas, de componentes estruturais e de materiais quando estes estão submetidos a um determinado tipo de carregamento. Com a sua utilização, torna-se possível determinar o estado de tensão e de deformação de qualquer corpo sólido, seja qual for a sua geometria. Esta ferramenta tem vindo a ser extensivamente utilizada na avaliação do comportamento de estruturas de betão armado (Sena-Cruz, 2005; Azevedo, 2011).

Para tornar possível a simulação da resposta estrutural de estruturas de betão armado, com base no método dos elementos finitos, tornou-se necessário estabelecer formulações matemáticas que regem o comportamento dos materiais, bem como, inseri-las nos códigos computacionais dos programas de análise estrutural. Estas formulações são geralmente designadas por leis constitutivas e fornecem a relação entre tensão e extensão num determinado ponto do elemento estrutural a simular. Assim, adotando modelos constitutivos capazes de simular os fenómenos não lineares mais relevantes, o comportamento de estruturas de betão armado pode ser previsto

com elevada precisão desde o início do carregamento até à sua rotura, passando pela fase de comportamento linear e pela fase de comportamento não linear (Sena-Cruz, 2005).

Para simular o comportamento praticamente frágil do betão na rotura, tem sido utilizada a teoria não linear dos mecanismos de fratura. Esta teoria prevê três modos de fratura possíveis designados por modo I, II e III, consoante ocorram devido a um carregamento normal (tração), de corte no plano ou de corte em direção perpendicular ao plano, respetivamente (Nooru-Mohamed, 1992). Os três modos referidos descrevem essencialmente três movimentos cinemáticos independentes e são suficientes para descrever todos os modos de propagação de fendas num material elástico. Os três diferentes modos de fratura encontram-se apresentados na Figura 2.32.

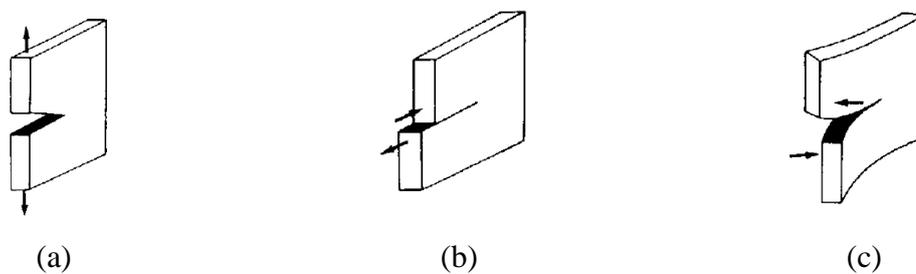


Figura 2.32 - Três modos de fratura (Broek, 2012): (a) modo I; (b) modo II; (c) modo III.

Na prática, a maior parte das fendas resultam do modo I de carregamento e os restantes modos ocorrem combinados com o primeiro. Na Figura 2.33, é representado um ensaio de flexão, sob quatro pontos de carga, de uma viga de betão armado. Nesta podem ser observadas duas fendas, a “A” e a “B”. A fenda “A” corresponde ao modo I de abertura de fenda e forma-se quando a resistência à tração do betão é excedida. Na zona de corte, a fenda “B” tende a inclinar-se como consequência da rotação da tensão principal. Tal como a fenda “A”, a “B” também se inicia de acordo com o modo I de fratura, perpendicularmente à maior tensão principal. Durante o restante carregamento, a abertura de fenda continua a evoluir e é solicitada por corte, simultaneamente. Assim, na zona 2 e 3 da fenda “B” representada, surge uma combinação do modo I e do modo II de fratura. Este é um exemplo onde a fenda se forma devido a tração e torna-se um modo misto de fendilhação devido à presença de esforços de corte (Nooru-Mohamed, 1992).

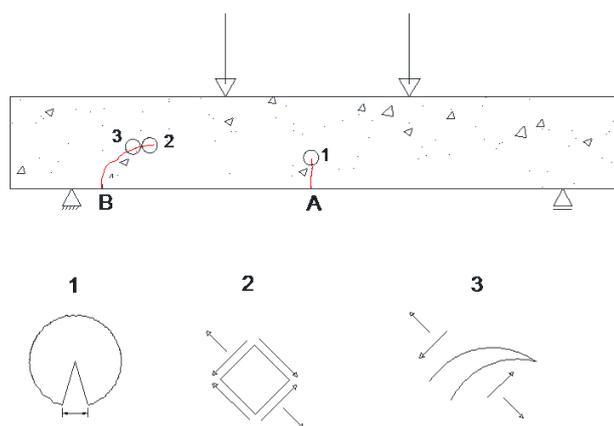


Figura 2.33 - Ensaio de flexão sob quatro pontos de carga de uma viga de betão armado.

Para simular numericamente, através do método dos elementos finitos, o comportamento de elementos estruturais, dois diferentes conceitos de fendilhação são geralmente usados: modelo de fenda discreta (*discrete crack model*) e modelo de fenda distribuída (*smearred crack model*).

Relativamente ao modelo de fenda discreta, um nó comum entre dois elementos finitos é dividido em dois quando a resistência à tração do material é atingida. Uma desvantagem deste modelo é a constante alteração na conectividade entre elementos da malha de elementos finitos. Além disso, o desenvolvimento da fenda ocorre num trajeto pré-definido ao longo dos bordos do elemento finito. Sendo assim, o modelo de fenda discreta é especialmente adequado na simulação de estruturas de betão onde a rotura é governada pela ocorrência de um pequeno número de fendas, e segundo um trajeto que possa ser previsto (Sena-Cruz, 2005; Noor-Mohamed, 1992).

Por sua vez, o modelo de fenda distribuída é mais apropriado do que o modelo de fenda discreta na simulação de estruturas de betão armado com uma percentagem de reforço que assegure a estabilização de fenda, uma vez que várias fendas podem surgir na estrutura. Neste conceito, o processo de fendilhação é iniciado quando a máxima tensão principal, num determinado ponto do material, excede a respetiva resistência à tração, tal como é traduzido pelo critério de rotura de Rankine ilustrado na Figura 2.34. Este critério foi inserido no código computacional do programa *Femix 4.0*, posteriormente apresentado.

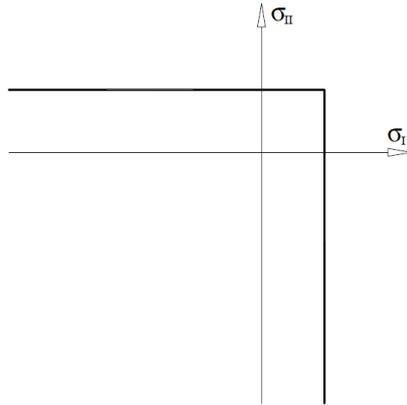


Figura 2.34 - Superfície de cedência de Rankine no espaço 2D das tensões principais (Sena-Cruz, 2005).

Posteriormente, a propagação da fenda é controlada pela forma do diagrama de *tension-softening/stiffening* e pela energia de fratura do material. Na Figura 2.35, são apresentados dois diferentes diagramas disponíveis no programa *Femix 4.0*, que será posteriormente abordado.

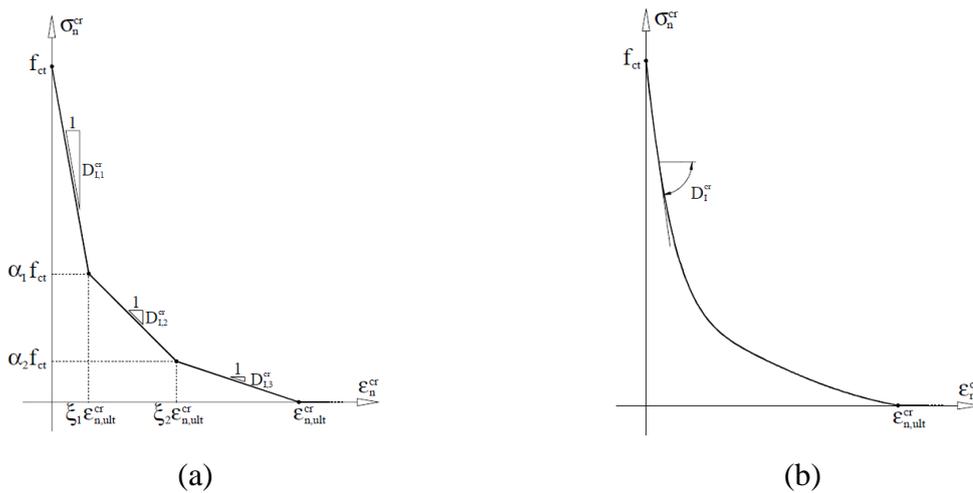


Figura 2.35 – Diagramas de *tension-softening/stiffening* (Sena-Cruz, 2005): (a) diagrama trilinear; (b) diagrama exponencial.

Ao contrário do modelo discreto, no modelo de fenda distribuída é assumido que as fendas surgem em bandas paralelas ao longo de uma zona de tamanho finito em vez de apenas se formar uma única fenda. De modo a assegurar a objetividade da malha, a energia dissipada ao longo do processo de propagação da fenda, está associada com o comprimento característico do elemento finito. Com esta abordagem, é permitida uma implementação numérica mais fácil, visto que apenas são requeridas alterações na matriz de rigidez do elemento após a abertura de

fenda. Além disso, a tipologia do elemento finito original permanece constante, o que é computacionalmente conveniente (Sena-Cruz, 2005; Nooru-Mohamed, 1992).

O modelo de fenda distribuída pode ainda ser dividido em três categorias denominadas por: (i) modelo de fenda distribuída original ou modelo de fenda distribuída de orientação fixa (*single-fixed smeared crack*), (ii) modelo de fenda distribuída rotativa (*rotating smeared crack*) e (iii) modelo de multi-fendas distribuídas de orientação fixa (*multi-fixed smeared crack*).

No modelo de fenda distribuída de orientação fixa (*single-fixed smeared crack*), quando a tensão principal local atinge a resistência à tração do material, ou quando a combinação das tensões principais violam o critério de rotura por corte, uma fenda fixa forma-se perpendicularmente à tensão principal de tração, isto é, a direção normal ao plano da fenda é coincidente com a orientação da tensão principal máxima quando ocorre abertura de fenda, mantendo-se com essa orientação ao longo de todo o processo de carregamento. Contudo, devido a fenômenos como a interligação dos agregados, a tensão principal pode alterar a sua orientação, podendo, uma vez mais, exceder a sua tensão principal de tração. Além disso, se um modelo de amolecimento for usado após a abertura de fendas, uma tensão normal residual pode atuar sobre a mesma e como consequência da sua combinação com esforços de corte, podem surgir rotações da tensão principal. Neste caso, esta abordagem preveria uma resposta numérica mais rígida do que a observada experimentalmente (Sena-Cruz, 2005; Nooru-Mohamed, 1992).

Para evitar as inconveniências referidas, surgiram os modelos de fenda distribuída rotativa (*rotating smeared crack*) e o modelo de multi-fendas distribuídas de orientação fixa (*multi-fixed smeared crack*). Na primeira, o sistema de coordenadas local da fenda está em constante rotação assim que existam alterações na direção dos eixos principais enquanto que na segunda várias fendas fixas podem ir surgindo de acordo com o critério adotado para a abertura de fenda, o que significa que é permitida a formação de fendas primárias e secundárias não ortogonais num único ponto. Neste último conceito, a fenda forma-se perpendicularmente à tensão principal quando a resistência à tração do material é atingida, mas, depois da sua formação, cargas adicionais originam alterações nas direções das tensões principais. Assim, quando o ângulo entre a direção da tensão principal e a direção normal à fenda existente, excede um valor limite (dependendo do critério de rotura adotado), uma nova fenda secundária pode surgir e fendas

existentes podem fechar. Com tudo isto, o modelo de multi-fendas distribuídas de orientação fixa, pode ser considerado o mais flexível e sofisticado (Sena-Cruz, 2005; Nooru-Mohamed, 1992).

2.4.2 Programa Femix 4.0

O *Femix 4.0* é um programa de análise de estruturas que tem por base o método dos elementos finitos (MEF) e será utilizado na presente dissertação para simular o comportamento de estruturas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP. Este começou por ser desenvolvido em 2000 por Álvaro Azevedo, Joaquim Barros e José Sena Cruz. Em 2002, o desenvolvimento do programa passou a contar com a colaboração de Ventura Gouveia e em 2004 com Alberto Ribeiro e Vítor Cunha (Sena-Cruz, 2005).

O respetivo código computacional é baseado no método dos deslocamentos e permite realizar análises estáticas ou dinâmicas, bem como efetuar análises lineares ou não lineares. As simulações nas quais o comportamento dos materiais é considerado não linear, podem ser realizadas em controlo de força ou de deslocamento. Neste caso, o programa tem em consideração o processo de fendilhação do betão quando sujeito a esforços de tração, o esmagamento do betão quando sujeito a esforços de compressão e efeitos de plastificação no aço, tendo disponível cerca de 20 modelos constitutivos. Além disso, nas análises não lineares, vários modelos constitutivos podem ser considerados simultaneamente, permitindo combinar, por exemplo, betão reforçado com diferentes componentes de reforço às quais são atribuídas diferentes leis constitutivas, elementos de interface com as respetivas leis de aderência e molas não lineares. No cálculo numérico, várias técnicas avançadas estão disponíveis como o método de *Newton-Raphson* combinado com a técnica do *arc-length* e algoritmos de *path dependent* e *path independent*, que se baseiam numa análise incremental iterativa onde o carregamento vai aumentando segundo vários fatores de carga até à rotura do elemento estrutural simulado (Sena-Cruz *et al.*, 2007).

Na Figura 2.36, apresentam-se alguns dos vários tipos de elementos finitos inseridos no código computacional do software *Femix 4.0*, nomeadamente pórticos e treliças 3D, elementos em estado plano de tensão e deformação, elementos de casca plana e curva e elementos de sólidos

3D. Relativamente ao número de nós, os elementos lineares podem ter dois ou três nós, enquanto que os elementos planos podem ser constituídos por quatro, oito ou nove nós e os elementos de casca por oito ou vinte nós. A biblioteca de elementos disponíveis é ainda complementada com um conjunto de molas pontuais, lineares ou de superfície e também com vários tipos de elementos de interface para simular a aderência entre diferentes materiais. Elementos de linha podem ainda ser embebidos em elementos planos ou de volume para simular varões de reforço (Sena-Cruz *et al.*, 2007).

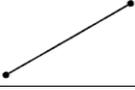
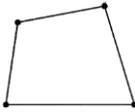
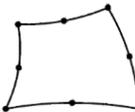
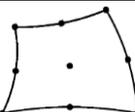
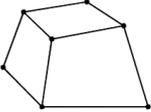
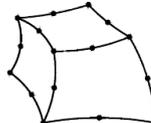
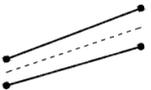
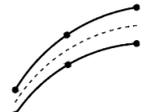
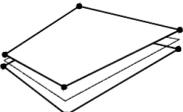
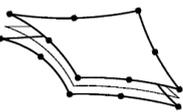
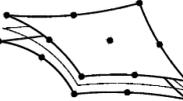
Forma do elemento	Descrição	Aplicação
	1 Nó	Ponto (2D ou 3D)
	Linear 2 Nós	Treliça (2D ou 3D) Viga (2D ou 3D)
	Linear 2 Nós	Viga Timoshenko (2D ou 3D) Cabo embebido (2D ou 3D)
	Quadrático 3 Nós	
	Lagrangian 4 Nós	Estado plano de tensão (2D) Laje Mindlin (2D) Casca Mindlin (3D) Casca Ahmad (3D) Mola de superfície (2D ou 3D)
	Serendipity 8 Nós	
	Lagrangian 9 Nós	
	Lagrangian 8 Nós	Sólido (3D)
	Serendipity 20 Nós	
	Linear 4 Nós	Interface linear (2D)
	Quadrático 6 Nós	
	Lagrangian 8 Nós	Interface de superfície (3D)
	Serendipity 16 Nós	
	Lagrangian 18 Nós	

Figura 2.36 - Tipos de elementos finitos disponíveis no programa *Femix 4.0*. Adaptado de Sena-Cruz (2005).

CAPÍTULO 3

PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

O programa experimental realizado no âmbito da presente dissertação teve como principal objetivo contribuir para o conjunto de tomadas de decisões no projeto *FRPLongDur*. Assim, aspectos como as configurações de ensaio, as geometrias dos provetes de betão, os distintos sistemas de reforço adotados que recorrem a laminados de CFRP, bem como outros parâmetros que influenciam o comportamento estrutural dos elementos de betão reforçados com sistemas FRP, foram analisados nesta campanha experimental. Para isso, dois tipos de ensaio, a diferentes escalas, foram realizados no Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho (LEST): (i) ensaios à mesoescala com recurso a ensaios de aderência/arranque direto, em provetes de betão reforçados com laminados de CFRP de acordo com a técnica EBR e (ii) ensaios à escala real com recurso a ensaios de flexão em faixas de laje, reforçadas com laminados de CFRP de acordo com as técnicas EBR e NSM.

Relativamente aos ensaios de arranque direto, estes tiveram como objetivo desenvolver um protocolo de ensaio para o projeto *FRPLongDur* de modo a estudar o comportamento da ligação entre o laminado de CFRP e a superfície de betão, quando aplicada a técnica EBR. Para isso, a configuração adotada foi estabelecida e utilizada pela primeira vez no âmbito deste trabalho, constituindo, assim, um estudo preliminar e de comprovação do seu bom desempenho, para futuramente ser adotada no projeto de investigação. Por outro lado, alguns parâmetros que influenciam o desempenho da ligação do sistema EBR CFRP foram avaliados, nomeadamente: (i) tipo de tratamento da superfície de betão precedente à colagem externa do reforço CFRP e (ii) comprimento de ancoragem/amarração (L_b). Previamente à instalação do reforço CFRP e após a aplicação do tratamento de superfície, procedeu-se à medição do nível de rugosidade de todas as superfícies onde o laminado viria a ser colado recorrendo a um sensor laser, de modo a estudar a influência do nível de rugosidade e a eficácia de cada tratamento superficial no desempenho da técnica EBR.

Por sua vez, os ensaios de flexão em faixas de laje tiveram como principal objetivo investigar o seu comportamento estrutural quando aplicadas as técnicas EBR e NSM. Nestes, as variáveis de estudo foram as seguintes: (i) o sistema de reforço adotado, EBR e NSM, (ii) a largura da secção transversal do laminado de CFRP, nas lajes reforçadas com a técnica EBR, (iii) a profundidade da ranhura onde o reforço CFRP é instalado, de acordo com a técnica NSM, (iv) o número de laminados de CFRP adotados, ao longo da secção transversal da faixa de laje, no reforço com a técnica NSM, quando a mesma quantidade de material compósito é utilizado e (v) o espaçamento transversal entre os laminados de CFRP quando utilizado o mesmo número de laminados no reforço, de acordo com a técnica NSM.

3.2 Ensaios de arranque direto

3.2.1 Programa de ensaios

De modo a estudar o comportamento da ligação entre o laminado de CFRP e a superfície de betão, quando aplicada a técnica de colagem externa (EBR), foi estabelecido um programa de 24 ensaios de arranque direto, recorrendo a 12 provetes prismáticos de betão, reforçados em duas faces opostas. O laminado de CFRP utilizado no reforço dos provetes tinha uma secção transversal de $50 \times 1.2 \text{ mm}^2$, sendo este um parâmetro fixo da investigação experimental. Com o objetivo de analisar a influência do tratamento da superfície de betão, previamente à colagem externa do laminado, bem como da respetiva rugosidade superficial proporcionada, foram distinguidas duas séries de ensaio de acordo com a técnica de tratamento de superfície utilizada: (i) tratamento com esmeril, recorrendo a uma mó de pedra até se tornarem visíveis os agregados (GR - *Grinding*) e (ii) tratamento com jato de areia (SB - *Sand Blasting*). A seleção das duas técnicas de tratamento de superfície baseou-se no facto de estas terem vindo a ser as mais utilizadas pela comunidade científica no reforço com a técnica EBR. Em complementaridade, por cada série de ensaios foram adotados três comprimentos de ancoragem (L_b) diferentes: 150, 200 e 250 mm. De acordo com recomendações de projeto, como por exemplo as referidas na CNR (2013), o comprimento ótimo de ancoragem (l_e) determinado para o caso dos ensaios realizados, é aproximadamente igual a 200 mm, daí a definição dos três comprimentos de ancoragem utilizados que possibilitam a existência de um comprimento inferior, um comprimento aproximadamente igual e um comprimento superior ao valor de l_e . O objetivo da variação do comprimento da ligação entre laminado de CFRP e superfície de betão foi perceber

a sua influência no desempenho da técnica EBR, mais concretamente, na resistência ao destacamento prematuro do laminado de CFRP. Um conjunto de quatro ensaios nas mesmas condições, isto é, mesmo tratamento superficial de betão e mesmo comprimento de ancoragem do laminado de CFRP, foi realizado, permitindo a obtenção de resultados mais fiáveis e a perceção do seu grau de disparidade.

O programa de ensaios de arranque direto realizado é apresentado na Tabela 3.1. A nomenclatura adotada na denominação de cada ensaio, segue o formato genérico ST_LbX_Y, onde “ST” representa o tratamento de superfície utilizado (GR ou SB, para o tratamento que recorre a esmeril e jato de areia, respetivamente), “X” traduz o comprimento de ancoragem adotado (150, 200 e 250 mm) e “Y” refere-se ao número do provete nas mesmas condições de ensaio.

Tabela 3.1 - Programa de ensaios de arranque direto e respetivas designações.

Tratamento da superfície de betão	Comprimento de ancoragem [mm]	Designação do ensaio
GR (esmeril)	150	GR_Lb150_1
		GR_Lb150_2
		GR_Lb150_3
		GR_Lb150_4
	200	GR_Lb200_1
		GR_Lb200_2
		GR_Lb200_3
		GR_Lb200_4
	250	GR_Lb250_1
		GR_Lb250_2
		GR_Lb250_3
		GR_Lb250_4
SB (jato de areia)	150	SB_Lb150_1
		SB_Lb150_2
		SB_Lb150_3
		SB_Lb150_4
	200	SB_Lb200_1
		SB_Lb200_2
		SB_Lb200_3
		SB_Lb200_4
	250	SB_Lb250_1
		SB_Lb250_2
		SB_Lb250_3
		SB_Lb250_4

3.2.2 Geometria e configuração de ensaio

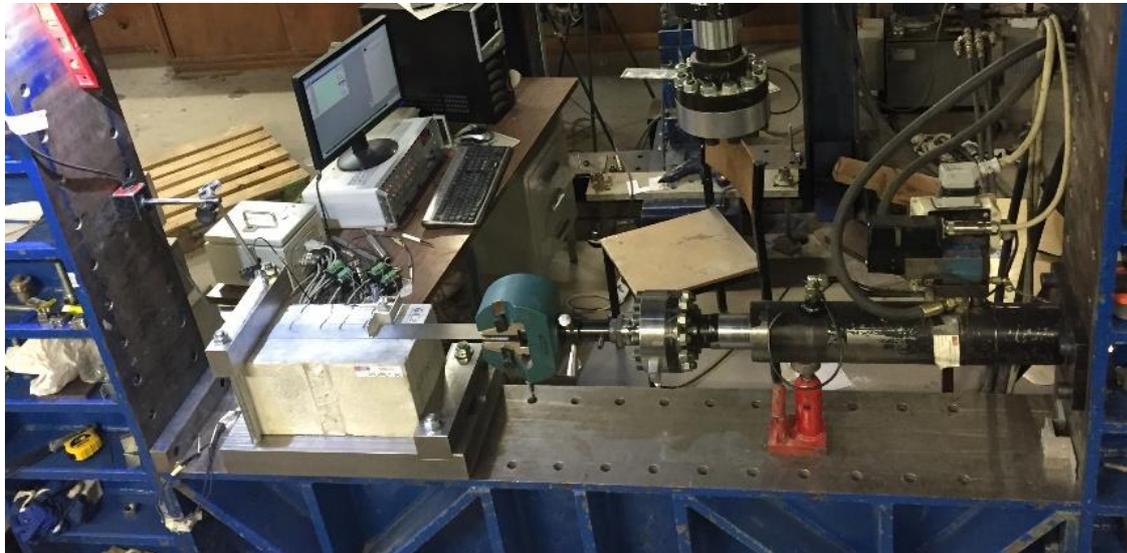
Para efetuar os ensaios de arranque direto, com o objetivo de analisar o comportamento da ligação CFRP-betão, recorreu-se a provetes prismáticos de betão de dimensões $200 \times 200 \times 400 \text{ mm}^3$, reforçados em duas faces opostas de acordo com a técnica EBR. A Figura 3.1 (a) representa a vista geral do pórtico de ensaio utilizado. Na Figura 3.1 (b), é apresentada a geometria dos provetes prismáticos e a configuração de ensaio utilizada, neste caso para um comprimento de ancoragem de 200 mm. Torna-se importante salientar o facto da zona de ancoragem do laminado de CFRP à superfície de betão começar a uma distância de 100 mm da face do provete, de modo a evitar a rotura prematura provocada pela formação de um cone de betão, na extremidade carregada. O provete de betão foi colocado horizontalmente sobre uma peça metálica em aço (suporte S1 de acordo com a Figura 3.1 (b)) com 70 mm de espessura, 300 mm de largura e 550 mm de comprimento, encontrando-se esta fixa ao pórtico rígido através de 8 varões roscados M16, aos quais foi aplicado um momento de aperto de $20 \text{ N} \times \text{m}$. Esta foi fabricada com a espessura referida de modo a que, após a colocação do provete, a altura a que se encontra o eixo longitudinal do laminado de CFRP relativamente à base do pórtico, coincida precisamente com a altura a que o eixo da garra se encontra relativamente à mesma referência. Para acomodar algumas imperfeições geométricas provenientes da fase da betonagem, chapas metálicas com espessuras de 0.8 mm, 1.2 mm e/ou 2 mm foram complementadas ao sistema, sendo estas colocadas entre o suporte S1 e a face inferior do provete de betão, de modo a que o ensaio se realize sem qualquer excentricidade adicional. Cada provete prismático foi impedido de se deslocar (tanto quanto possível) na direção do carregamento, através de uma peça metálica em aço de suporte inferior (suporte S2 de acordo com a Figura 3.1 (b)), que funcionou como elemento de reação numa altura de 50 mm, encontrando-se fixo ao suporte S1 através de dois varões roscados M20. Além disso, um elemento de suporte superior em aço de dimensões $50 \times 70 \times 300 \text{ mm}^3$ (suporte S3 de acordo com a Figura 3.1 (b)) foi colocado sob a parte traseira do provete e fixo ao suporte S1 através de dois varões roscados M20, de modo a garantir que o deslocamento vertical do provete nessa zona, durante o ensaio, fosse desprezável. Os ensaios foram realizados com recurso a um sistema hidráulico servo-controlado, sendo a força de arranque medida através de uma célula de carga (cuja capacidade máxima é de 200 kN e a precisão de 0.05% F.S.) colocada entre o atuador e a garra onde o laminado é fixo.



(c)



(d)



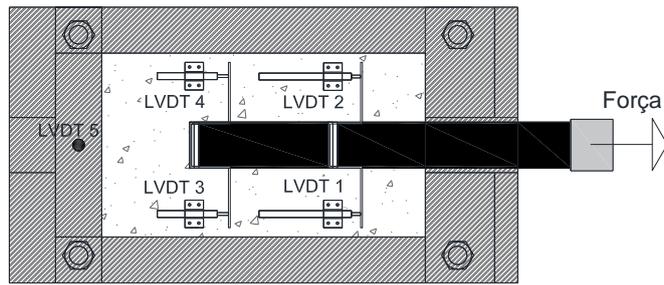
(e)

Figura 3.1 (cont.) - Configuração do ensaio de arranque direto: (a) vista geral do pórtico de ensaio; (b) geometria e configuração de ensaio; (c) (d) e (e): fotos do ensaio. Nota: todas as dimensões estão em milímetros.

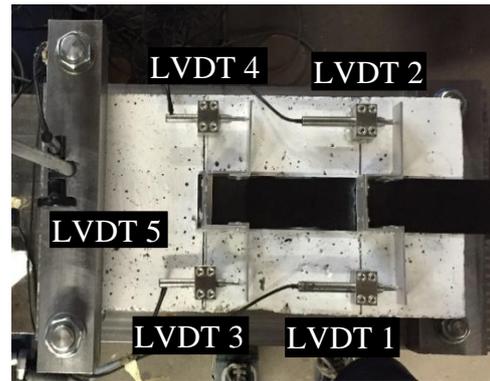
Para medir o deslocamento relativo entre o laminado de CFRP e a superfície de betão ao nível da mesma secção transversal do provete (deslizamento), os ensaios foram instrumentados com 4 transdutores de deslocamento - LVDT's (*Linear Variable Differential Transducer*), dois deles colocados na extremidade carregada do comprimento de ancoragem (LVDT 1 e 2) e os dois restantes colocados na extremidade livre (LVDT 3 e 4). Com este procedimento foi possível medir os deslizamentos s_l (*loaded end slip*) e s_f (*free end slip*) recorrendo, respetivamente, à

média dos registos nos LVDT 1/2 e LVDT 3/4. A localização dos transdutores de deslocamento colocados na extremidade carregada e livre do comprimento de ancoragem pode ser observada na Figura 3.2. Por impossibilidade física na colocação de transdutores de deslocamento na extremidade livre para os provetes com comprimento de ancoragem de 250 mm, nestes apenas foi instrumentada a extremidade carregada do respetivo comprimento de ancoragem. Adicionalmente, foi instalado um transdutor de deslocamento (LVDT 5) sobre o suporte S3 (ver Figura 3.1 (b)), para registar o deslocamento vertical experimentado pelo provete, no decorrer do ensaio. A amplitude de leitura do LVDT 1, 2 e 5 é de ± 5 mm (precisão de 0.24% F.S.) enquanto que no LVDT 3 e 4 é de ± 2.5 mm (precisão de 0.24% F.S.). Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento na extremidade carregada (LVDT 2), impondo uma velocidade de ensaio de $2 \mu\text{m/s}$.

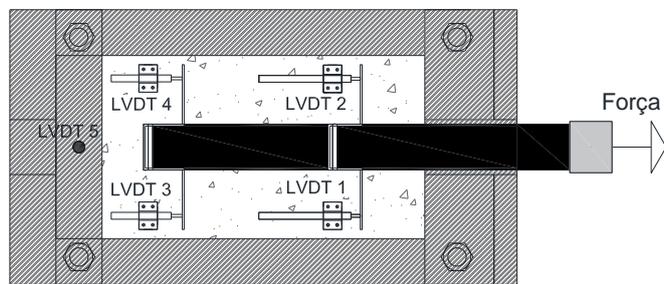
Complementarmente aos transdutores de deslocamentos instalados em cada provete, num dos provetes de cada série foram usados extensómetros TML BFLA-5-3-3L (*SG – Strain Gauges*) ao longo do eixo longitudinal do laminado com o objetivo de medir as extensões axiais experimentadas por este durante o processo de carregamento. A disposição e o espaçamento entre extensómetros adotados nos ensaios, variaram em função do comprimento de ancoragem do respetivo provete, de acordo com o ilustrado na Figura 3.3. De salientar que idealmente deveriam usar-se um número significativo de extensómetros, com o objetivo de se registar de uma forma quase contínua as extensões no laminado. Contudo, por razões de limitação de custos, utilizou-se um número reduzido de extensómetros.



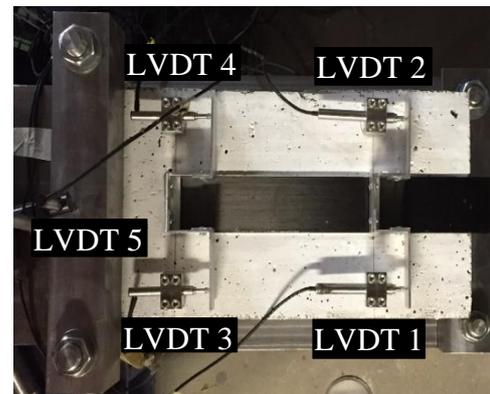
(a1)



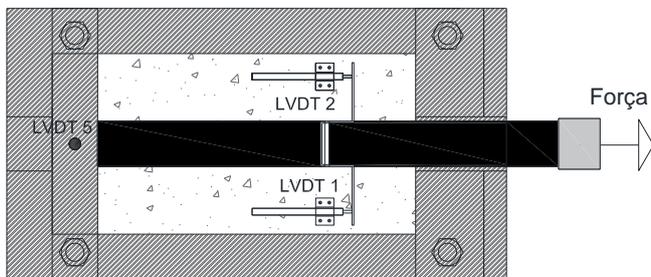
(a2)



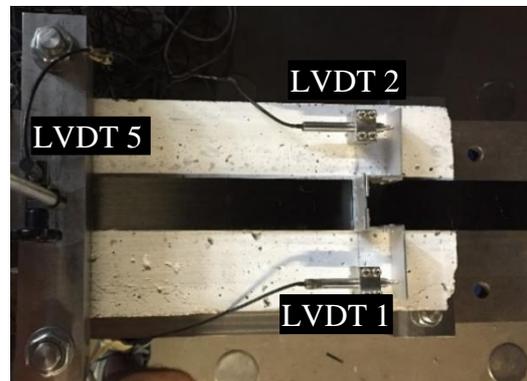
(b1)



(b2)



(c1)



(c2)

Figura 3.2 - Disposição dos transdutores de deslocamento (LVDT) nos ensaios de arranque direto (esquema e fotografia): (a), (b) e (c): comprimento de ancoragem de 150, 200 e 250 mm, respectivamente.

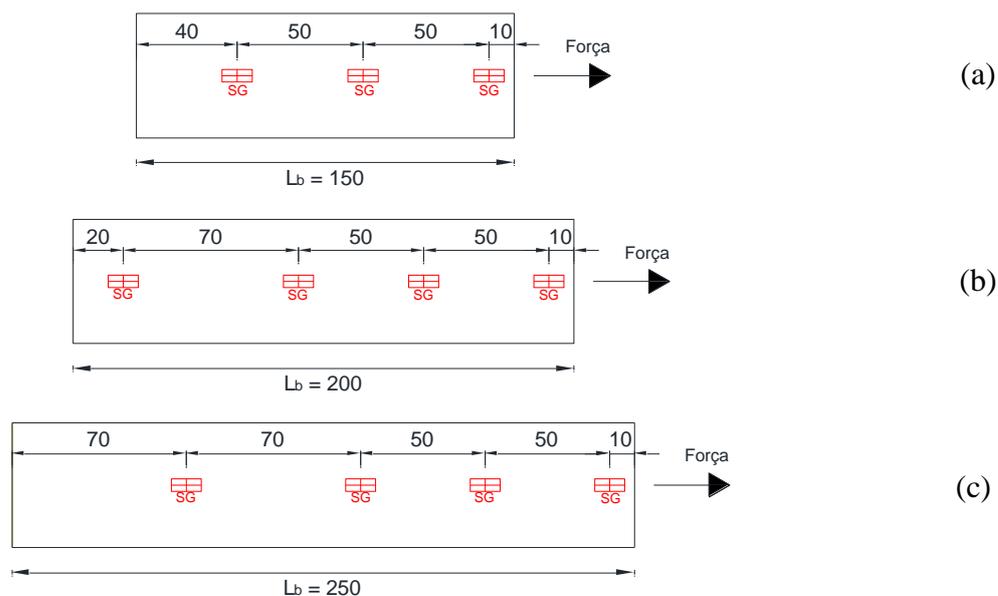


Figura 3.3 - Distribuição dos extensômetros (SG) ao longo do comprimento de ancoragem (L_b) na superfície do laminado de CFRP: (a) $L_b = 150$ mm; (b) $L_b = 200$ mm; (c) $L_b = 250$ mm. Nota: todas as dimensões estão em milímetros.

3.2.3 Modelo numérico de dimensionamento e previsão do desempenho do sistema de ensaio

O sistema de ensaio de arranque direto adotado foi concebido, dimensionado e utilizado pela primeira vez no âmbito da presente dissertação com o objetivo de se estudar a aderência de sistemas EBR CFRP para que posteriormente seja utilizado no projeto de investigação onde se insere este trabalho. Consequentemente, uma análise crítica ao sistema foi realizada.

O processo de desenvolvimento do sistema de ensaio passou pelas seguintes etapas: (i) definição da geometria do provete de betão; (ii) definição da geometria e constituição do sistema de suporte.

A análise do comportamento estrutural das distintas soluções de configuração de ensaio estudadas, foi realizada através de modelos numéricos desenvolvidos computacionalmente no programa de elementos finitos *Femix 4.0* (software este que foi já apresentado no Capítulo 2 deste documento) onde foi simulado o ensaio de arranque direto. Os principais parâmetros analisados em cada um dos modelos numéricos realizados, com o objetivo de ser definida a configuração de ensaio definitiva, foram os seguintes: (i) deslocamentos horizontais

experimentados pelo provete de betão, (ii) deslocamentos verticais experimentados pela peça em aço de suporte superior (suporte S3 de acordo com a Figura 3.1 (b)), de modo a obterem-se deslocamentos verticais negligenciáveis durante o processo de carregamento e (iii) estado de tensão no provete de betão com o objetivo de assegurar a ausência de rotura por corte do mesmo.

Nestes estudos considerou-se que o betão a ser utilizado no fabrico dos provetes prismáticos estava limitado à classe de resistência C30/37. Por outro lado, foi decidido que os laminados de CFRP a usar teriam uma largura de 50 mm.

A solução final conduziu a um provete de secção transversal de $200 \times 200 \text{ mm}^2$ com um comprimento longitudinal de 400 mm, uma peça em aço de suporte superior de secção de $50 \times 70 \text{ mm}^2$ com um desenvolvimento de 300 mm ligada ao suporte de base por intermédio de dois varões roscados em aço com 20 mm de diâmetro.

O ensaio de arranque direto foi simulado como um problema em estado plano de tensão. A Figura 3.4 apresenta a malha de elementos finitos, a geometria e as condições de suporte utilizadas no modelo numérico de simulação do ensaio. O provete de betão e o suporte S3 (ver Figura 3.1 (b)) foram modelados com recurso a elementos finitos *Serendipity* de 8 nós em estado plano de tensão com um esquema de integração de *Gauss-Legendre* 2×2 , o laminado de CFRP foi modelado através de elementos de cabo 2D quadráticos de 3 nós com dois pontos de integração de *Gauss-Legendre* enquanto os varões metálicos em aço foram simulados através de elementos de barra lineares 2D.

No que respeita às condições de apoio, admitiu-se que a base metálica de suporte ao provete (suporte S1 de acordo com a Figura 3.1 (b)) funciona como apoio unilateral. Esta hipótese deve-se ao facto de esta ser bastante rígida e se encontrar ligada a um pórtico metálico de elevada rigidez. Assim, esta foi simulada através de um conjunto de molas de comportamento não linear, aplicadas em cada um dos elementos finitos que simulam o betão ao longo da face de contacto com a base metálica. Com esta opção e, atribuindo às propriedades mecânicas das molas uma rigidez inicial e uma resistência à compressão muito elevadas, o provete de betão fica impedido de experimentar deslocamentos verticais descendentes e possibilitado de levantar

durante o processo de carregamento. O suporte S2 (ver Figura 3.1 (b)), colocado na secção frontal do provete (extremidade carregada), foi simulado através de um conjunto de apoios simples, aplicados num desenvolvimento vertical de 50 mm, impedindo que este experimente translações horizontais (tanto quanto possível) quando o laminado for tracionado no decorrer do ensaio. A ligação do varão roscado com o suporte S1 foi simulada com um apoio de encastramento, impedindo que este experimente translações nas duas direcções e a rotação. O comprimento de ancoragem (L_b) do laminado de CFRP à superfície de betão considerado no modelo numérico foi de 250 mm.

Para efeitos da presente análise, admitiu-se aderência perfeita entre o laminado de CFRP e o provete de betão. A mesma consideração foi estabelecida na superfície de contacto entre o suporte S3 (ver Figura 3.1 (b)) e o provete de betão.

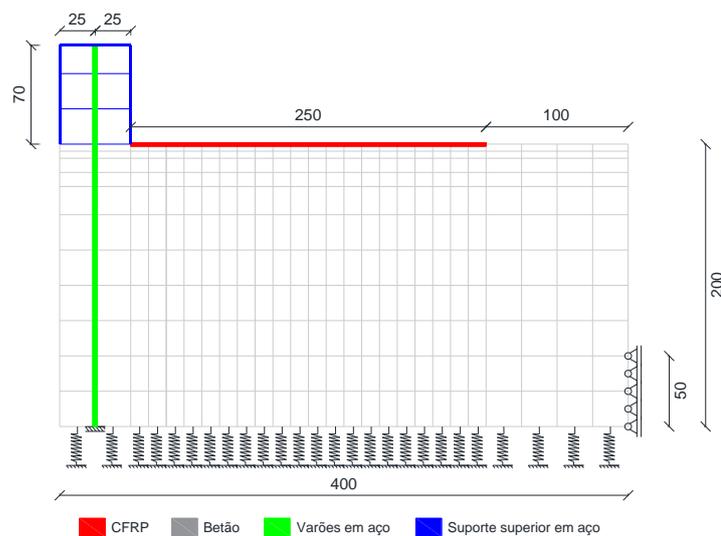


Figura 3.4 - Malha de elementos finitos, geometria e condições de apoio do modelo numérico de simulação do ensaio de arranque direto. Nota: todas as dimensões estão em milímetros.

A Tabela 3.2 inclui as propriedades do betão, do aço e do laminado de CFRP, adotadas nas simulações numéricas efetuadas. Como se tratava de um modelo de dimensionamento, foi considerado que o betão e o aço apresentavam um comportamento linear elástico em complementaridade com o real comportamento linear elástico do laminado de CFRP.

Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas adotadas para os diferentes materiais na simulação numérica do ensaio de arranque direto.

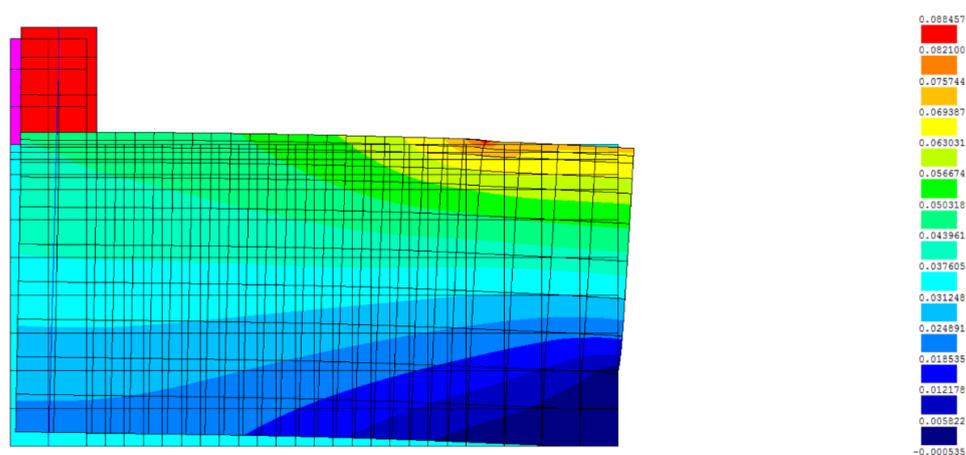
Material	Módulo de Elasticidade [GPa]	Coefficiente de <i>Poisson</i>
Betão	31	0.2
Aço	200	0.3
Laminado de CFRP	165	0.2

De acordo com vários estudos já realizados, quando um elemento de betão reforçado com um laminado de CFRP, de acordo com a técnica EBR, é sujeito a um carregamento que faz com que o laminado experimente tensões de tração, geralmente ocorre uma rotura por destacamento precoce ao nível da interface betão/CFRP. As extensões axiais que o CFRP atinge na iminência da rotura raramente ultrapassam os 0.6 % (Correia *et al.*, 2015). Este valor de extensão ocorre habitualmente nas situações de *intermediate debonding*.

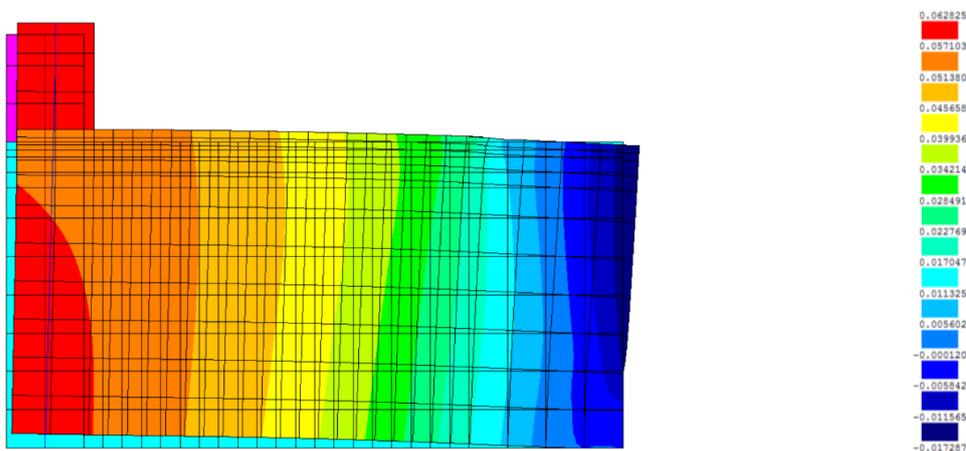
Considerando o modo de rotura referido anteriormente e admitindo que (i) o laminado de CFRP (secção retangular de $50 \times 1.2 \text{ mm}^2$) apresenta um módulo de elasticidade (E_f) de 165 GPa, (ii) que no momento da rotura a máxima extensão experimentada por este é de 0.6% (iii) e que este exhibe um comportamento linear elástico, obtém-se uma força máxima instalada no CFRP de 59.4 kN. Assim, na simulação do ensaio de arranque direto, foi aplicada na extremidade do laminado uma força de tração de 60 kN. Com estas considerações, os resultados obtidos através do modelo numérico tornam-se bastantes conservativos, visto que a força de tração aplicada na extremidade do laminado, na simulação numérica, é expectavelmente superior à força máxima resistente que será obtida experimentalmente, aquando a rotura por destacamento do sistema de reforço. Tais certezas provêm do facto de o modo de rotura expectável em ensaios de arranque direto ser o *end debonding* que, de acordo com estudos já realizados, ocorre para extensões no laminado consideravelmente inferiores a 0.6%.

Por todas as opções conservativas tomadas na elaboração dos modelos numéricos de dimensionamento e previsão do desempenho do sistema de ensaio, seria expectável que os resultados obtidos numericamente (deslocamentos e estado de tensão no provete de betão) fossem bastante superiores aos que seriam obtidos experimentalmente.

Na Figura 3.5 é apresentada a deformada obtida na simulação numérica do sistema de ensaio em termos de deslocamentos horizontais e verticais, quando a carga de tração de 60 kN é aplicada na extremidade do laminado de CFRP. De acordo com os resultados obtidos, o deslocamento vertical máximo experimentado pela peça em aço de apoio superior (ver Figura 3.5 (b)) foi de 0.05 mm. Em termos de deslocamentos horizontais do provete de betão, um valor de 0.07 mm foi obtido. Mesmo com todas as opções conservativas na modelação numérica, os valores de deslocamento obtidos são relativamente baixos, o que permite prever um bom desempenho do sistema de ensaio.



(a)

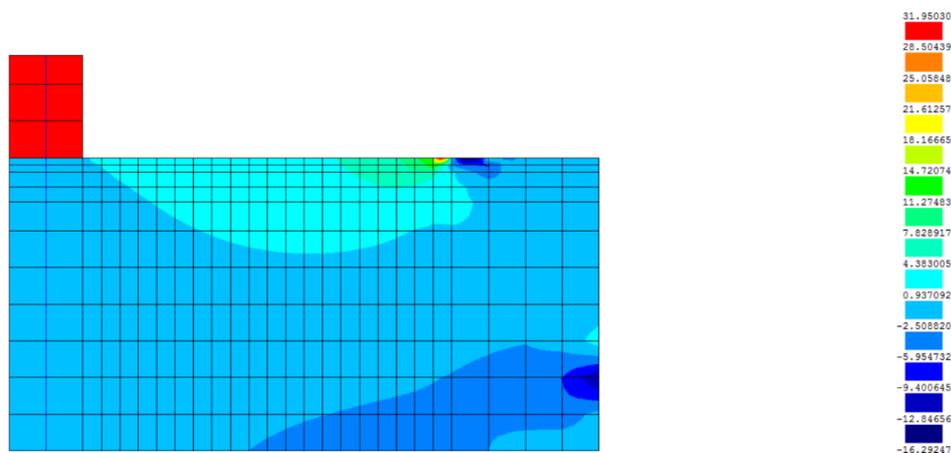


(b)

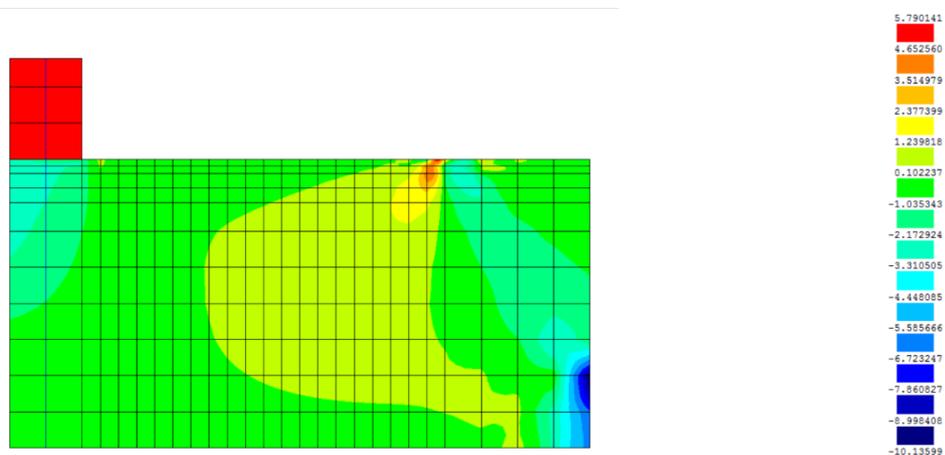
Figura 3.5 - Deslocamentos experimentados pelo provete de betão: (a) deslocamentos horizontais; (b) deslocamentos verticais. Nota: todos os valores estão em milímetros.

A Figura 3.6 apresenta os resultados obtidos numericamente em termos de tensões normais horizontais e verticais (σ_x e σ_y , respetivamente) e tensões tangenciais (τ_{xy}), experimentadas

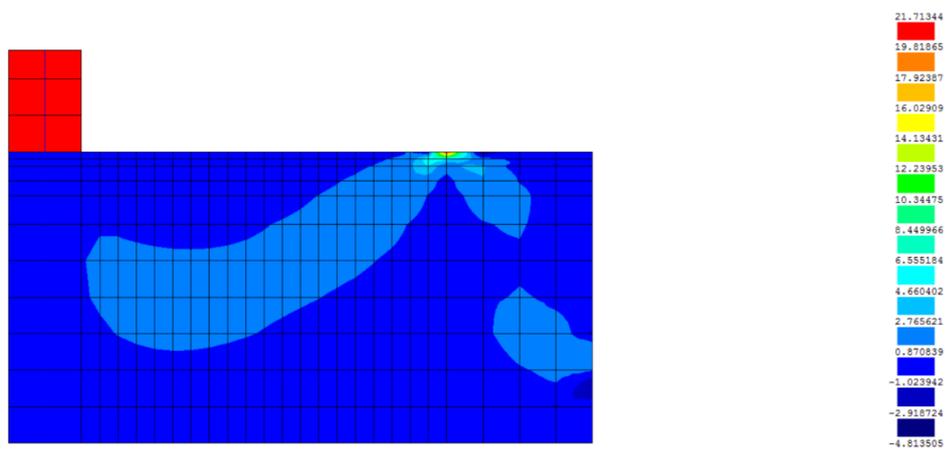
pele do provete de betão quando aplicada a carga de tração de 60 kN na extremidade do laminado de CFRP.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.6 - Tensões experimentadas pelo provete de betão: (a) tensões normais na direção horizontal (σ_x); (b) tensões normais na direção vertical (σ_y); (c) tensões tangenciais (τ_{xy}). Nota: todos os valores estão em [MPa].

Foi também avaliado o estado de tensão no provete de betão na zona mais crítica, com o objetivo de analisar a possibilidade de o mesmo romper por esforço transverso. Assim, foi selecionado um elemento finito da zona central do provete de betão (ver Figura 3.7) e calculadas as tensões principais máxima (σ_I) e mínima (σ_{II}).

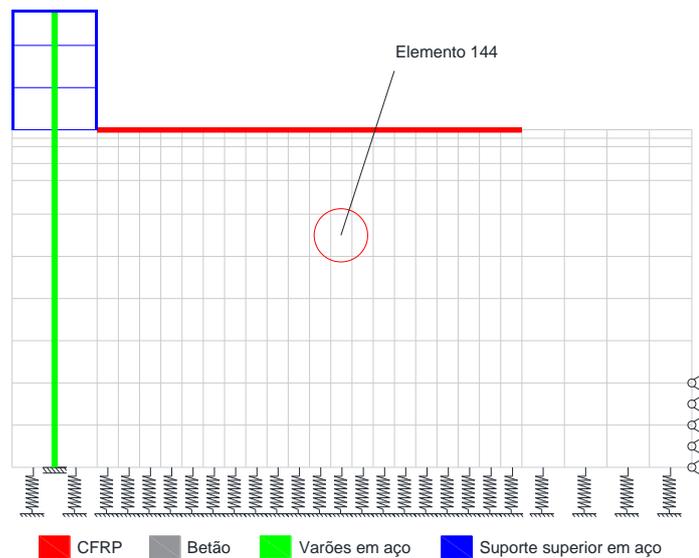


Figura 3.7 - Elemento finito selecionado para o cálculo das tensões principais máxima e mínima.

De acordo com (Azevedo, 1996), as tensões principais são calculadas com a seguinte expressão:

$$\sigma_{I,II} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (3.1)$$

Analisando os resultados obtidos numericamente, as tensões normais (σ_x - horizontal e σ_y - vertical) e tensão tangencial (τ_{xy}) experimentadas pelo elemento finito selecionado foram iguais a 1.55 MPa, 0.28 MPa e 0.95 MPa, respetivamente. Aplicando a equação (3.1), os valores obtidos para as tensões principais máxima e mínima do elemento 144, foram respetivamente 2.06 MPa e -0.227 MPa. Assim, é possível concluir que um betão de classe de resistência C25/30 ($f_{ctm}=2.6$ MPa, segundo a NP EN 1992-1-1 2008), é suficiente para que rotura por corte do provete de betão não ocorra, não existindo, por isso, a necessidade do uso de armadura de esforço transverso.

3.2.4 Medição da rugosidade de superfície do betão

Tal como referido anteriormente, a eficácia da técnica de tratamento de superfície aplicada no betão dos provetes prismáticos, previamente à instalação do sistema EBR CFRP, foi um dos parâmetros avaliados no programa experimental de ensaios de arranque direto do presente trabalho. O tratamento de superfície consiste na remoção da camada superficial de betão com características inapropriadas de modo a tornar a superfície sã, limpa, com ausência da leitada de cimento e com adequado nível de rugosidade. Duas técnicas de tratamento foram aplicadas: (i) tratamento com esmeril, recorrendo a uma mó de pedra e (ii) tratamento com jato de areia. Considerando os dois diferentes processos de tratamento de superfície e com o objetivo de identificar a sua influência nos resultados obtidos com os ensaios arranque direto, foi medido o nível de rugosidade de todas as superfícies onde posteriormente seria instalado o sistema EBR CFRP. Com esta estratégia é possível relacionar a técnica de tratamento com o nível de rugosidade que esta permite que a superfície adquira, e posteriormente avaliar a sua influência no desempenho em termos de resistência da ligação entre o laminado de CFRP e superfície de betão.

O procedimento de medição da rugosidade da superfície foi baseado na utilização de um sensor laser que permitiu retirar informações qualitativas e quantitativas da rugosidade das diferentes superfícies. Foram analisados 3 perfis longitudinais na zona de ancoragem onde posteriormente seria instalado o sistema EBR CFRP, em cada uma das 24 superfícies dos provetes. O trajeto realizado pelo laser na aquisição do nível de rugosidade foi o ilustrado na Figura 3.8. As principais características do sensor laser utilizado encontram-se detalhadas na Tabela 3.3.

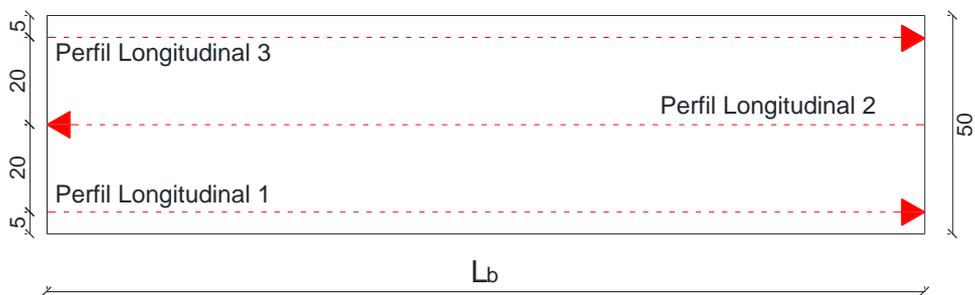


Figura 3.8 - Trajeto percorrido pelo laser na aquisição do nível de rugosidade em 3 perfis longitudinais da zona de ancoragem do sistema EBR CFRP-betão. Nota: todas as dimensões estão em milímetros.

Tabela 3.3 - Propriedades do sensor laser *SICK OD2 – N50W10U0*.

Parâmetros	Valor
Gama de medição	40 mm a 60 mm
Resolução	5 μm
Repetibilidade	15 μm
Frequência de medição	2 kHz
Tamanho do ponto de luz (distância)	0.5 mm \times 1 mm (50 mm)

A Figura 3.9 representa a configuração do sistema de medição da rugosidade da superfície. O sensor laser foi instalado num sistema metálico que constitui parte de um mecanismo concebido para produzir um deslocamento lento a velocidade constante, bem como permitir que o sensor, durante a aquisição, execute um trajeto retilíneo e paralelo à superfície analisada. A taxa de deslocamento do sistema foi de 8.8 mm/s e a frequência de aquisição de dados de 34 Hz, permitindo obter leituras consecutivas com espaçamento de 0.3 mm.

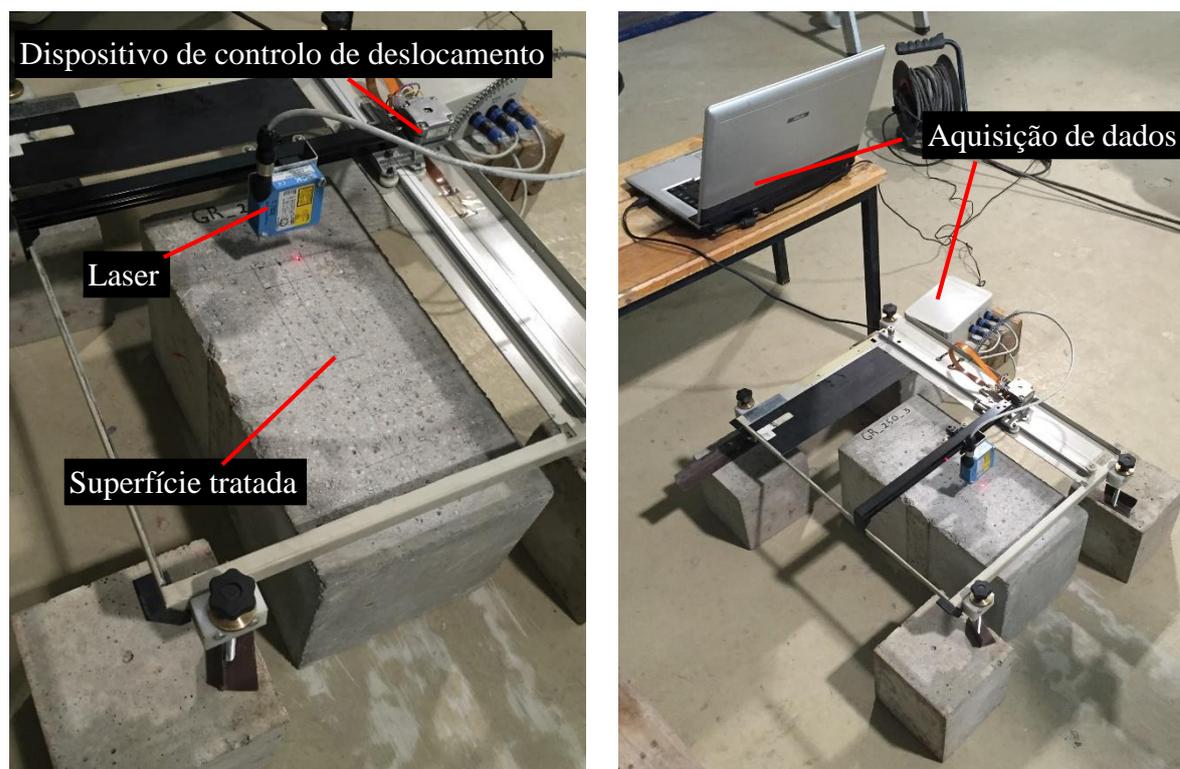


Figura 3.9 - Fotos ilustrativas da configuração do sistema de medição da rugosidade da superfície dos provetes.

3.3 Ensaios de flexão em faixas de laje

3.3.1 Programa de ensaios

O programa de ensaios de flexão em faixas de laje foi estabelecido de modo a clarificar algumas dúvidas relativas à influência da geometria do laminado de CFRP, da sua quantidade e distribuição ao longo da secção transversal das faixas de laje. De facto, estes aspetos foram considerados como fundamentais no âmbito dos estudos preliminares do projeto *FRPLongDur*. O programa foi constituído por um conjunto de 7 faixas de laje de betão armado das quais (i) quatro foram reforçadas com o sistema NSM CFRP, (ii) duas foram reforçadas com o sistema EBR CFRP e ainda (iii) uma faixa de laje sem qualquer tipo de reforço designada por laje de referência. Todas as lajes ensaiadas possuíam a mesma geometria e a mesma taxa de armadura longitudinal de reforço materializada com recurso a varões de aço. Um aspeto importante referir, é o facto de qualquer uma das soluções de reforço ter sido adotada de modo a duplicar a capacidade de carga da faixa de laje de referência.

Relativamente às lajes reforçadas de acordo com a técnica NSM, laminados de CFRP de secção retangular com diferente área transversal foram utilizados: (i) laminados com secção de $20 \times 1.4 \text{ mm}^2$ e (ii) laminados com secção de $10 \times 1.4 \text{ mm}^2$. Todas as lajes foram reforçadas com a mesma quantidade total de material compósito. Os parâmetros variáveis nestes ensaios foram os seguintes: (i) número de laminados de CFRP utilizados no reforço das faixas de laje, de modo a perceber a influência da sua maior ou menor distribuição ao longo da secção transversal, (ii) espaçamento transversal adotado entre laminados de CFRP e (iii) profundidade da ranhura onde os laminados de CFRP foram instalados.

Nas lajes reforçadas de acordo com a técnica EBR, laminados de CFRP de secção retangular com diferente área transversal foram utilizados: (i) laminados com secção de $80 \times 1.2 \text{ mm}^2$ e (ii) laminados com secção de $100 \times 1.2 \text{ mm}^2$.

A Tabela 3.4 apresenta o programa de ensaios de flexão em faixas de laje realizado. A designação adotada para cada uma das lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP, apresenta a forma genérica NSM_LW_XY, onde “W” representa a largura (em milímetros) da secção transversal dos laminados utilizados, “X” representa o parâmetro que está a ser estudado na

respetiva laje (P – posição do laminado ou G – profundidade das ranhuras pré-executadas) e Y representa qual a posição ou profundidade da ranhura utilizada (a 1 ou a 2), visto que duas disposições de laminados e duas diferentes profundidades de ranhuras foram estudadas. Relativamente às lajes reforçadas com o sistema EBR CFRP, sendo a variável de estudo a largura da secção transversal do laminado, a designação adotada para cada uma das lajes apresenta a forma genérica EBR_LW, onde “W” representa a largura (em milímetros) do laminado de CFRP.

A percentagem total equivalente de armadura longitudinal de tração ($\rho_{s,eq}$), de cada uma das faixas de laje, é também apresentada na Tabela 3.4. Este parâmetro foi determinado através da equação (3.2), incluída em Sena-Cruz *et al.* (2012) onde b representa a largura da faixa de laje; A_s e A_f representam, respetivamente, a área da secção transversal dos varões de aço longitudinais em tração e do sistema FRP; E_s e E_f traduzem o módulo de elasticidade do aço e do FRP, respetivamente; e , d_s e d_f são as distâncias desde a fibra superior mais comprimida do betão até ao eixo central dos varões de aço e sistema FRP, respetivamente.

$$\rho_{s,eq} = \frac{A_s}{bd_s} + \frac{E_f}{E_s} \cdot \frac{A_f}{bd_f} \quad (3.2)$$

Tabela 3.4 - Programa de ensaios de flexão em faixas de laje e respetivas designações.

Séries	Técnica de reforço	Número de laminados utilizados no reforço	Secção transversal do laminado ⁽¹⁾ [mm ²]	Profundidade da ranhura [mm]	Distância transversal entre laminados consecutivos [mm]	$\rho_{s,eq}$ (%)	Designação
Referência	-	-	-	-	-	0.436	REF
Série 1	Subsérie 1.1	2	20×1.4	25	324	0.503	NSM_L20_P1
					200	0.503	NSM_L20_P2
	Subsérie 1.2	4	10×1.4	25	150	0.505	NSM_L10_G1
				15		0.502	NSM_L10_G2
Série 2	-	1	80×1.2	-	-	0.544	EBR_L80
	-		100×1.2			0.571	EBR_L100

Notas: ⁽¹⁾ Largura × espessura.

3.3.2 Geometria e configuração de ensaio

Na Figura 3.10, é representada a geometria da secção transversal e longitudinal de cada uma das faixas de laje que constitui o programa de ensaios. As faixas de laje de betão armado adotadas no presente programa experimental possuíam um comprimento total de 2600 mm, 600 mm de largura e 120 mm de espessura. A armadura longitudinal inferior era constituída por cinco varões com 8 mm de diâmetro ($5\varnothing 8$), o que corresponde a uma taxa de armadura longitudinal de tração (ρ_l) de 0.436%. A armadura longitudinal superior era, por sua vez, constituída por três varões com 6 mm de diâmetro ($3\varnothing 6$) e a armadura de distribuição transversal foi materializada por estribos de 6 mm de diâmetro espaçados de 300 mm ($\varnothing 6@0.3$). Esta solução de armaduras de reforço estrutural foi dimensionada de modo a que a rotura por esforço transverso de todas as lajes (laje de referência e lajes reforçadas com laminados de CFRP) fosse evitada, para além de ter sido assegurada a plastificação das armaduras de flexão sujeitas a esforços de tração. Foi adotado um recobrimento de 20 mm. Os laminados de CFRP, que constituem o sistema de reforço, foram aplicados num comprimento de 2200 mm, ficando uma extensão de laje de 200 mm sem sistema de reforço em cada uma das extremidades. Assim, foi assegurada a ausência do efeito de confinamento promovido pelos apoios nas extremidades em relação ao sistema de reforço.

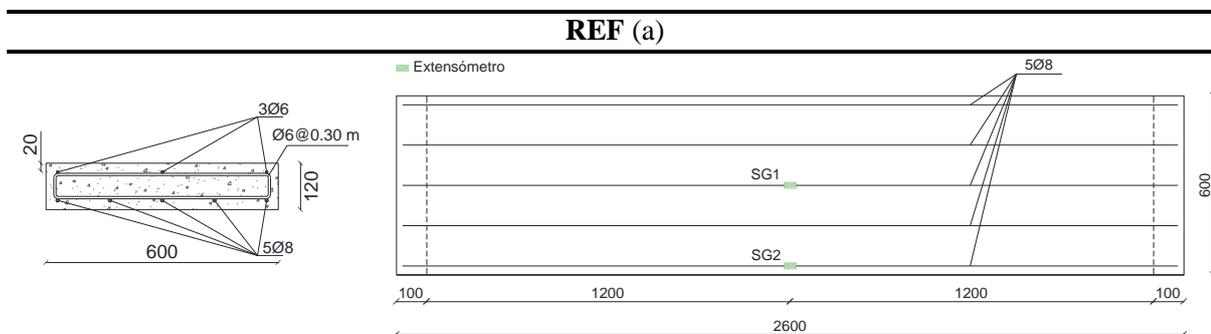


Figura 3.10 - (a) a (g): Geometria da secção transversal e longitudinal de cada uma das faixas de laje que constitui o programa de ensaios. Nota: todas as dimensões estão em milímetros.

Programa experimental

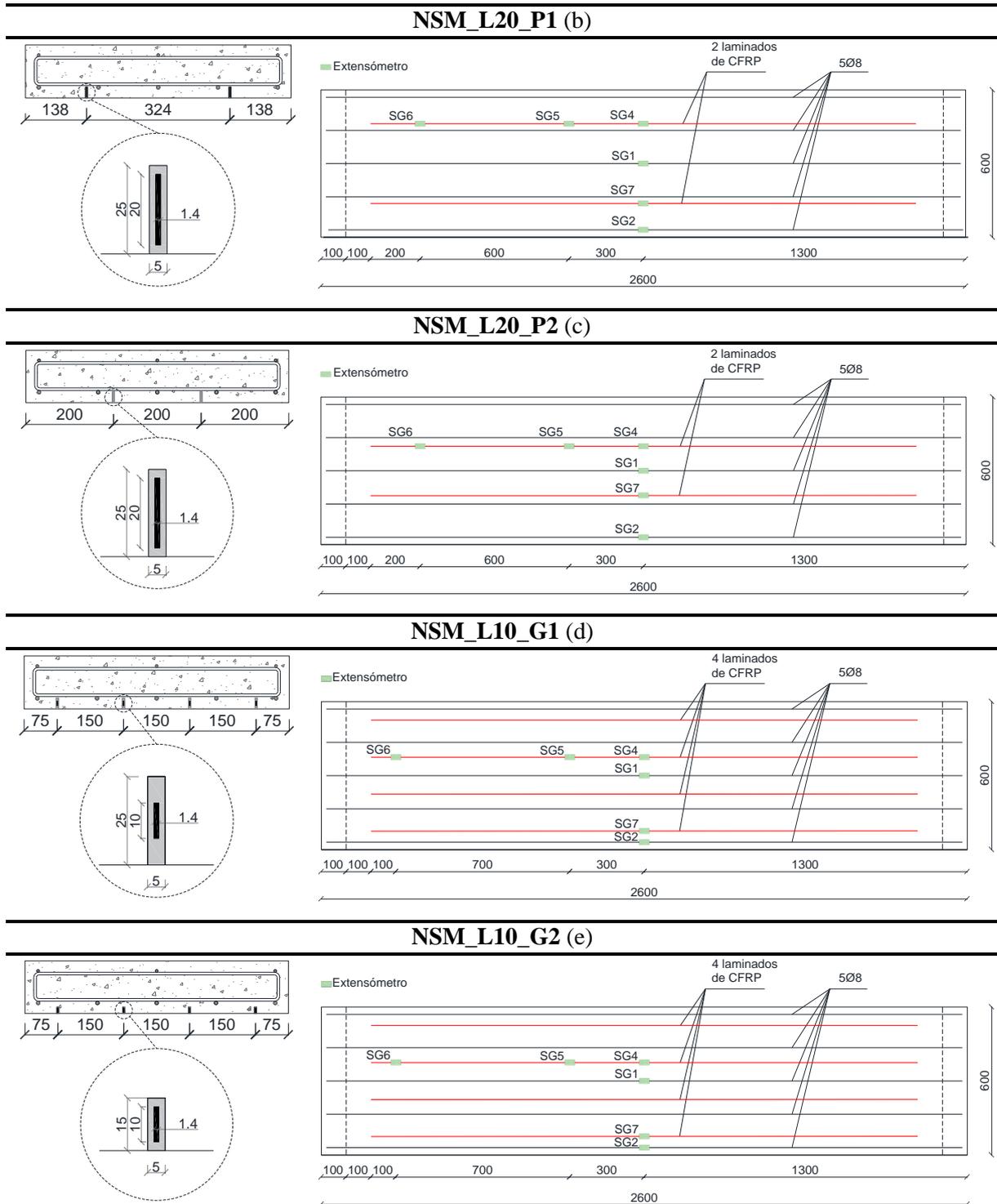
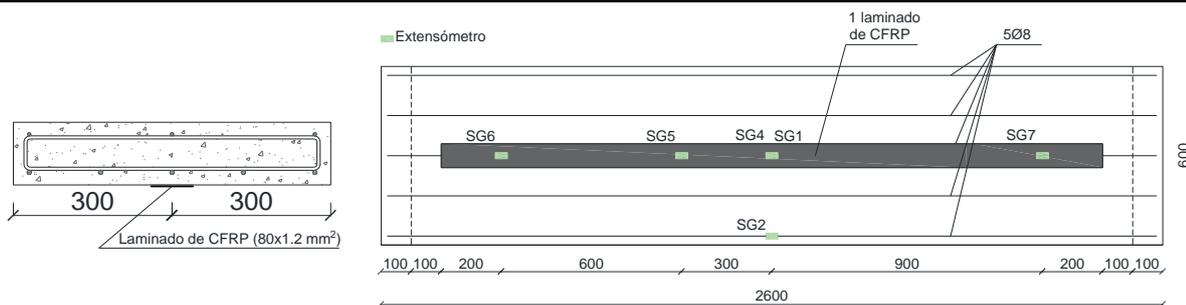


Figura 3.10 (cont.) - (a) a (g): Geometria da secção transversal e longitudinal de cada uma das faixas de laje que constitui o programa de ensaios. Nota: todas as dimensões estão em milímetros.

EBR_L80 (f)



EBR_L100 (g)

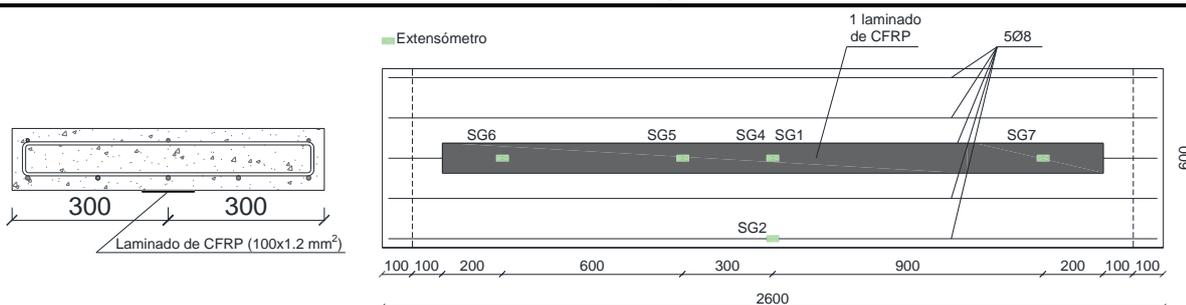


Figura 3.10 (cont.) - (a) a (g): Geometria da seção transversal e longitudinal de cada uma das faixas de laje que constitui o programa de ensaios. Nota: todas as dimensões estão em milímetros.

A Figura 3.11 apresenta a configuração de ensaio utilizada. Trata-se de um sistema de ensaio sob quatro pontos de carga de modo a que a faixa de laje fique sujeita aos esforços pretendidos. Com esta configuração de ensaio, o vão de corte é igual a 900 mm e a distância entre apoios é de 2400 mm.

Na instrumentação das faixas de laje, foi incluída a medição da carga aplicada, deslocamentos verticais ao longo do seu eixo longitudinal, extensões experimentadas pelos laminados de CFRP e pela armadura longitudinal inferior em distintas seções bem como as extensões no betão na zona de compressão máxima a meio vão.

Para monitorizar os deslocamentos verticais ao longo do eixo longitudinal das faixas de laje, foram instalados cinco transdutores de deslocamento (LVDT1 a LVDT5), como pode ser visualizado na Figura 3.11 (a) e (c). Os LVDT1 e LVDT5 têm um campo de medição de ± 25 mm (precisão de 0.09% F.S.), enquanto que no caso dos LVDT2 a LVDT4, o campo de medida é de ± 75 mm (precisão de 0.08% F.S.). Por sua vez, a força aplicada (F) foi monitorizada através de uma célula de carga com capacidade máxima de 200 kN (precisão de

$\pm 0.05\%$ F.S.). Os ensaios foram realizados sob controlo de deslocamento através do LVDT3, tendo sido adotada uma velocidade constante de $20 \mu\text{m/s}$.

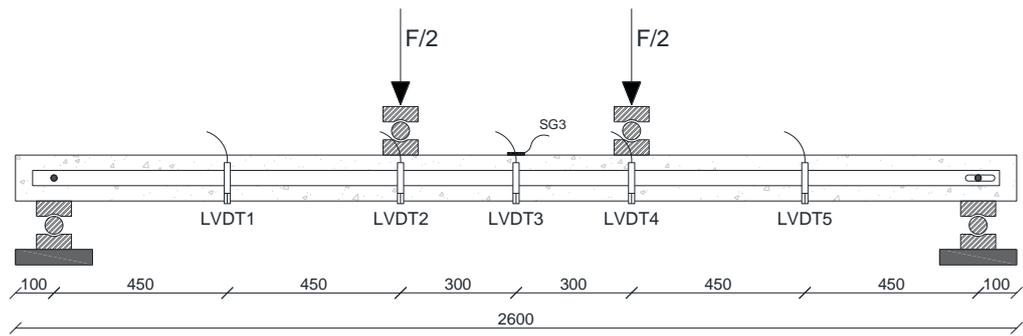
Dois extensómetros (SG1 e SG2) foram colocados, respetivamente, na secção a meio vão de dois dos varões que constituem a armadura longitudinal inferior, mais concretamente no varão central e num dos varões mais próximo da extremidade. Um terceiro extensómetro (SG3) foi colocado na fibra superior mais comprimida do betão. Relativamente à medição das extensões nos laminados de CFRP, diferentes distribuições foram adotadas dependendo da técnica de reforço aplicada nas faixas de laje.

Em cada uma das lajes onde foi aplicado o sistema EBR CFRP (ver Figura 3.10 (f) e (g)), um conjunto de quatro extensómetros foram instalados sobre a superfície do laminado nas seguintes secções: (i) a meio vão da faixa de laje (SG4), (ii) na secção de carregamento (SG5) e (iii) numa secção próxima ao comprimento efetivo de ancoragem que esta técnica de reforço proporciona (SG6 e SG7).

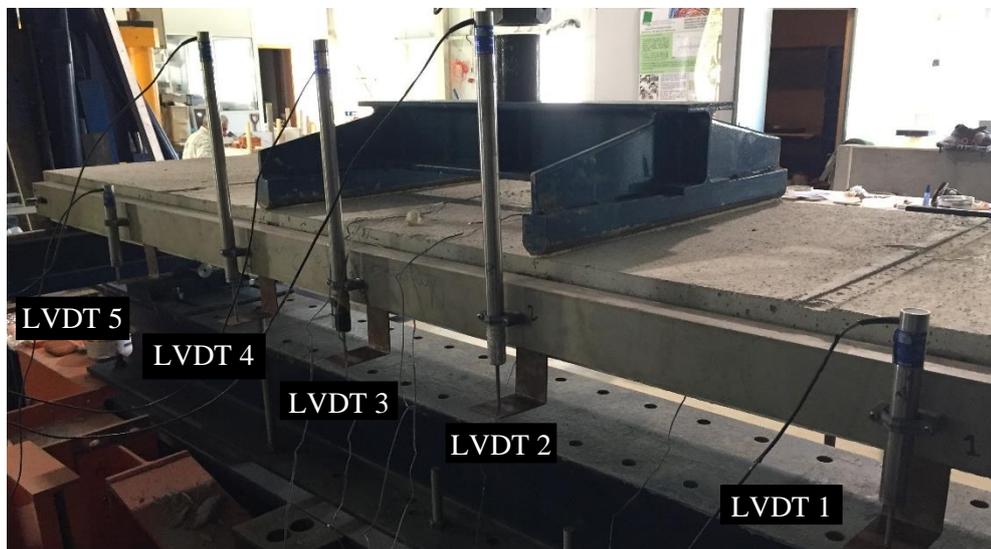
Relativamente às lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP (ver Figura 3.10 (b) a (e)), foram também instalados um número total de quatro extensómetros, existindo, em cada uma delas, um laminado instrumentado com três extensómetros (SG4 a SG6) e um outro laminado instrumentado com apenas um extensómetro na secção de meio vão (SG7). No laminado instrumentado com três extensómetros, adotou-se a seguinte configuração: (i) um primeiro extensómetro colocado a meio vão da faixa de laje (SG4), (ii) um segundo extensómetro colocado na secção de carregamento (SG5) e (iii) um terceiro instalado numa secção próxima ao comprimento efetivo de ancoragem proporcionado por esta técnica de reforço (SG6).

Assim, nas lajes reforçadas com a técnica EBR, de acordo com a CNR (2013), o comprimento de ancoragem efetivo previsto tem um desenvolvimento de cerca de 200 mm, sendo esta a distância adotada entre o início do comprimento de ancoragem e o extensómetro instalado. Nas lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP, consideraram-se distâncias de 100 mm e 200 mm entre o início do comprimento de ancoragem e a secção onde foi instalado o extensómetro, respetivamente para o laminado de secção $10 \times 1.4 \text{ mm}^2$ e $20 \times 1.4 \text{ mm}^2$ pois, de acordo com ensaios de aderência realizados, para comprimentos de ancoragem superiores a estes valores, torna-se possível levar o laminado de CFRP à rotura (Fernandes, 2016; Cruz, 2016).

Na medição das extensões nos laminados e na armadura longitudinal usaram-se extensómetros TML BFLA-5-3-3L, enquanto que na medição das extensões no betão foram usados extensómetros TML PFL-30-11-3L. A posição dos extensómetros utilizados na medição das extensões nos laminados de CFRP (SG4 a SG7) e na armadura longitudinal inferior (SG1 e SG2) pode ser visualizada nas secções longitudinais das faixas de laje ilustradas na Figura 3.10. A posição do extensómetro colocado na superfície de betão (SG3) pode ser visualizada na Figura 3.11 (a).



(b)



(c)

Figura 3.11 - Configuração do ensaio de flexão em faixas de laje: (a) esquema da configuração de ensaio; (b) e (c) fotos do ensaio. Nota: todas as dimensões estão em milímetros.

3.4 Caracterização dos materiais

3.4.1 Betão

A betonagem dos provetes prismáticos e das faixas de laje, que constituem o programa experimental do presente trabalho, ocorreram em fases distintas, tendo sido realizadas duas diferentes amassaduras. A caracterização mecânica do betão foi realizada através de ensaios de compressão em cilindros com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, a partir dos quais foram obtidos os valores médios do módulo de elasticidade (E_{cm}) e de resistência à compressão (f_{cm}), de acordo com as recomendações NP EN 12390-13:2014 e NP EN 12390-3:2011, respetivamente.

Previamente à realização dos ensaios de caracterização, procedeu-se cuidadosamente à retificação das faces onde viria a ser aplicada a força de compressão dos provetes cilíndricos, de modo a tornar a superfície completamente plana, sem que subsistisse qualquer descontinuidade resultante da fase de betonagem. O processo de retificação da superfície foi realizado no equipamento apresentado na Figura 3.12. Na Figura 3.13 (a) e (b), é apresentada a configuração dos ensaios de caracterização do betão enquanto que, na Figura 3.13 (c), é possível visualizar alguns dos modos de rotura obtidos após os ensaios de compressão.



Figura 3.12 - Retificação dos provetes cilíndricos.

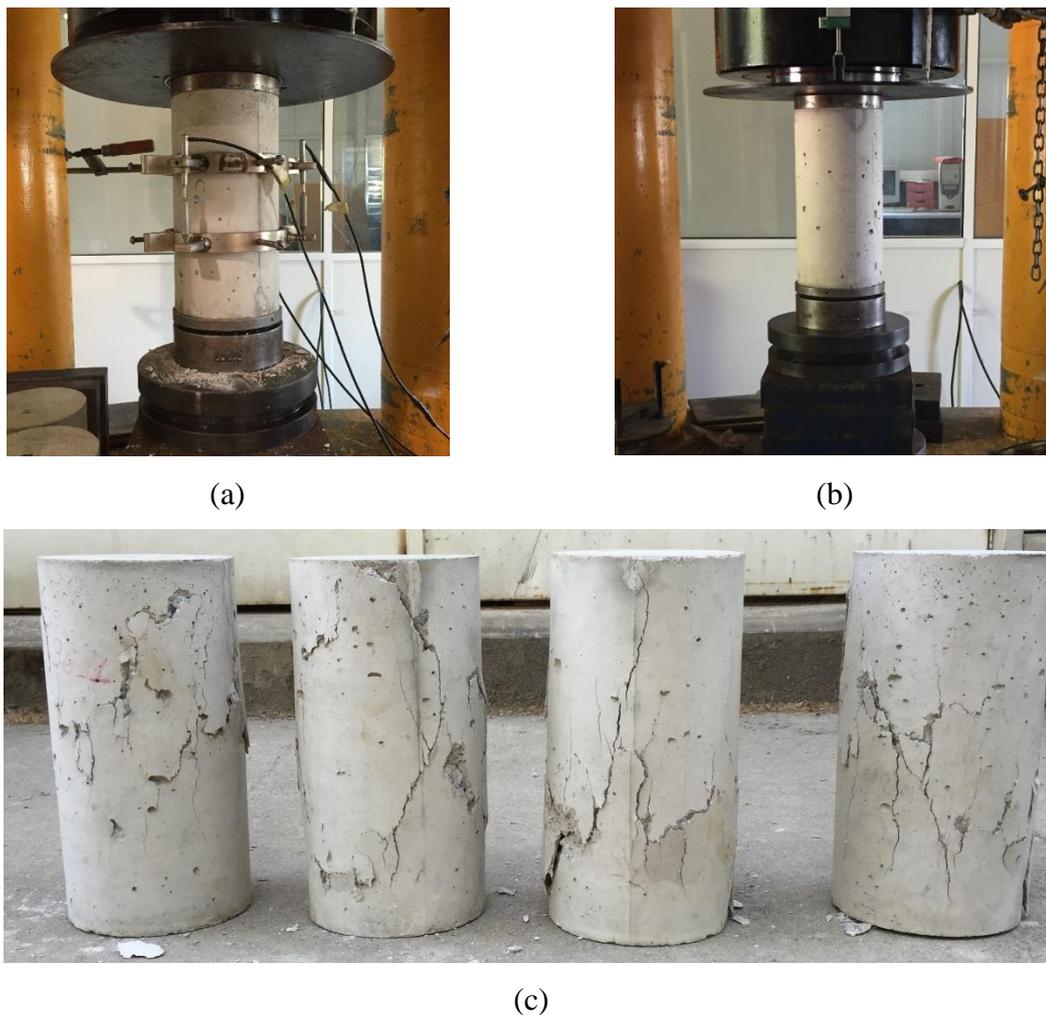


Figura 3.13 - Configuração dos ensaios de caracterização do betão: (a) obtenção do módulo de elasticidade (E_{cm}); (b) obtenção da resistência à compressão (f_{cm}); (c) modos de rotura por compressão dos provetes cilíndricos.

3.4.1.1 Betão relativo aos provetes prismáticos para os ensaios de arranque direto

A betonagem dos provetes prismáticos para os ensaios de arranque direto foi realizada nas instalações da empresa Unibetão – Indústrias de Betão Preparado, S.A. O betão foi fornecido pela mesma empresa com as seguintes características: classe de resistência C25/30, classe de exposição XC2 (P), máxima dimensão dos agregados de 12.5 mm e *slump* S4.

Os ensaios de caracterização das propriedades mecânicas à compressão do betão foram realizados aos 28 dias de idade. Foram ensaiados seis provetes cilíndricos de acordo com as

recomendações anteriormente referidas. Inicialmente foi ensaiado um provete até à rotura por compressão e, após ser conhecida a respetiva resistência do betão, foram ensaiados os restantes cinco provetes para a obtenção do módulo de elasticidade. Os provetes utilizados na determinação do módulo de elasticidade foram posteriormente ensaiados até à rotura em compressão. A Tabela 3.5 apresenta os resultados em termos médios da resistência à compressão (f_{cm}) e módulo de elasticidade (E_{cm}). Analisando os resultados obtidos, verifica-se que estes estão de acordo com o expectável segundo a norma NP EN 1992-1-1 2008 que prevê para um betão da classe C25/30, uma resistência média à compressão (f_{cm}) igual a 33 MPa e um módulo de elasticidade (E_{cm}) de 31 GPa.

Tabela 3.5 - Propriedades mecânicas à compressão do betão dos provetes prismáticos.

Idade do betão	f_{cm} [MPa]	E_{cm} [Gpa]
28 dias	33.4 (4.33%)	30.8 (2.84%)

Nota: os valores entre parêntesis representam o coeficiente de variação (CoV).

3.4.1.2 Betão relativo às faixas de laje para os ensaios à flexão

A betonagem das faixas de laje foi realizada nas instalações da empresa Tecnipor – Gomes & Taveira Lda. O betão foi fornecido pela empresa Unibetão – Indústrias de Betão Preparado, S.A. com as seguintes características: classe de resistência C30/37, classe de exposição XC4(P), máxima dimensão dos agregados de 12.5 mm e *slump* S4.

Os ensaios de caracterização das propriedades mecânicas à compressão do betão foram realizados aos 41 dias de idade e no momento dos ensaios à flexão das faixas de laje, mais concretamente aos 77 dias após a betonagem. Foram ensaiados quatro provetes cilíndricos em cada uma das idades, de acordo com as recomendações já referidas e seguindo a mesma metodologia já explicitada na secção referente à caracterização do betão dos provetes relativos aos ensaios de arranque direto. A Tabela 3.6 apresenta os resultados em termos médios da resistência à compressão (f_{cm}) e módulo de elasticidade (E_{cm}). Analisando os resultados obtidos, verifica-se que aos 41 dias de idade o betão apresentou propriedades resistentes inferiores às expectáveis segundo a NP EN 1992-1-1 2008 para um betão de classe C30/37, tanto em termos de resistência à compressão como em termos de módulo de elasticidade, visto

que esta prevê uma resistência média à compressão (f_{cm}) igual a de 38 MPa e um módulo de elasticidade (E_{cm}) de 33 GPa. Aos 77 dias de idade, o betão apresentou uma resistência média à compressão substancialmente superior à prevista pela referida normalização, enquanto que em termos de módulo de elasticidade, o valor obtido continuou a ser bastante inferior.

Uma tentativa de explicação destes resultados poderá estar associada ao facto de as condições de cura (temperatura e humidade) não terem sido as mais adequadas.

Tabela 3.6 - Propriedades mecânicas à compressão do betão das faixas de laje.

Idade do betão	f_{cm} [MPa]	E_{cm} [Gpa]
41 dias	33.3 (1.31%)	24.7 (5.26%)
77 dias	41.3 (1.64%)	25.8 ⁽¹⁾

Nota: os valores entre parêntesis representam o coeficiente de variação (CoV).

⁽¹⁾ Valor obtido a partir de apenas uma amostra de ensaio devido a problemas técnicos.

3.4.2 Varões de aço

No fabrico das armaduras, foi utilizado aço de classe A400 NR SD. A avaliação das suas características mecânicas foi realizada de acordo com a NP EN ISO 6892-1 (2012), onde se recorreu a ensaios de tração uniaxial em controlo de força, com uma velocidade de 700 N/s e 1200 N/s, respetivamente para os varões de diâmetro de 6 mm e 8 mm. Para cada um dos diâmetros de varão utilizados ($\varnothing 6$ e $\varnothing 8$), foram ensaiados 4 provetes com 600 mm de comprimento. Devido a uma falha técnica num dos ensaios de caracterização do varão de 6 mm de diâmetro, apenas foi tido em conta o resultado de três provetes.

Na Figura 3.14 são apresentadas as curvas tensão *versus* extensão obtidas nos ensaios de caracterização mecânica dos varões de aço utilizados no reforço das faixas de laje. Na Tabela 3.7 são apresentados os resultados médios obtidos para o módulo de elasticidade (E_{sm}), tensão de cedência (f_{ym}) e tensão última (f_{um}). Analisando os resultados obtidos e, tendo em conta a classe de aço adotada, conclui-se que o aço utilizado apresenta uma resistência maior do que a expectável.

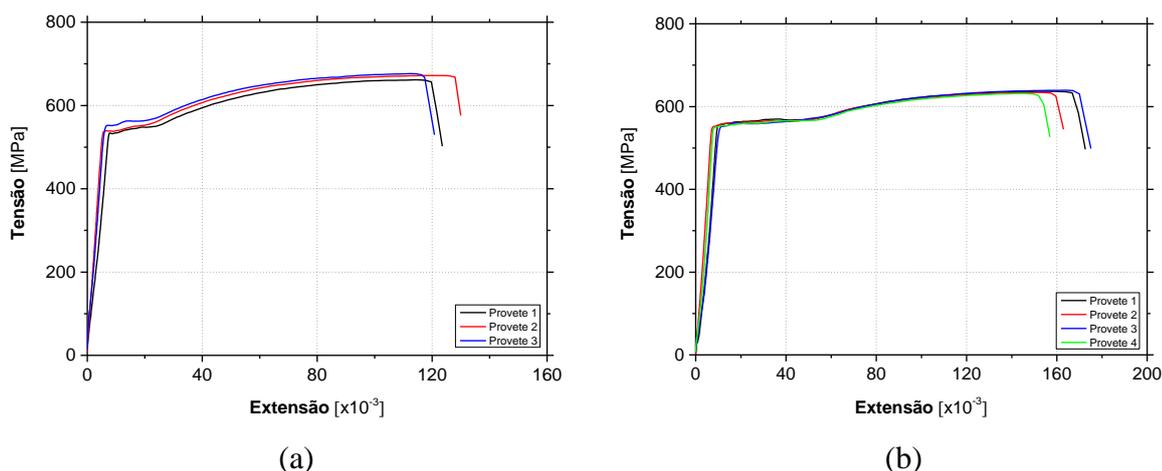


Figura 3.14 - Curvas tensão *versus* extensão obtidas nos ensaios de caracterização dos varões de aço: (a) diâmetro de 6 mm; (b) diâmetro de 8 mm.

Tabela 3.7 - Propriedades mecânicas dos varões de aço utilizados no programa experimental.

Varão	E_{sm} [GPa]	f_{ym} [MPa]	f_{um} [MPa]
Ø6	219.85 (1.61%)	543.94 (1.80%)	669.96 (0.92%)
Ø8	209.32 (7.69%)	551.21 (0.77%)	635.39 (0.46%)

Nota: os valores entre parêntesis representam o coeficiente de variação (CoV).

3.4.3 Laminados de CFRP

No presente trabalho experimental, foram utilizados 5 tipos de laminados de CFRP diferenciados pela geometria da secção transversal: (i) $10 \times 1.4 \text{ mm}^2$ (L10), (ii) $20 \times 1.4 \text{ mm}^2$ (L20), (iii) $50 \times 1.2 \text{ mm}^2$ (L50), (iv) $80 \times 1.2 \text{ mm}^2$ (L80) e (v) $100 \times 1.2 \text{ mm}^2$ (L100). Estes possuem a designação comercial “S&P Laminates CFK 150/2000” e são produzidos pela empresa “S&P Clever Reinforcement Ibérica Lda.”. Este tipo de laminado é pré-fabricado através de um processo de pultrusão, sendo constituído por fibras de carbono unidireccionais aglutinadas através de um adesivo vinilester e possui uma superfície externa lisa de cor preta. De acordo com a ficha técnica disponibilizada pelo fabricante, o módulo de elasticidade e a sua resistência à tração são superiores a 165 GPa e 2000 MPa, respetivamente.

A determinação do módulo de elasticidade (E_f), da resistência à tração (f_f) e da extensão correspondente à tensão de pico, foi efetuada de acordo com a ISO 527-5:2009, onde se conduziram à rotura um número total de 6 amostras de laminado de cada uma das diferentes

secções transversais, com comprimento e largura de 250 mm e 15 mm, respetivamente. Em cada uma das extremidades das amostras de laminado, foi colada uma peça metálica para evitar a sua rotura prematura devido a concentração de tensões introduzidas pelo sistema. Os ensaios foram conduzidos em controlo de deslocamento a uma velocidade de 2 mm/min com recurso a um sistema hidráulico servo-controlado (cuja capacidade máxima é de 1000 kN em tração) e a distância adotada entre as garras do sistema foi de 150 mm. Para determinar o módulo de elasticidade, foi instalado um “clip gauge” com um campo de medição de 50 mm na secção central das amostras. Em cada amostra de laminado, foram efetuadas três medições da sua espessura e largura através de um paquímetro digital com precisão de ± 0.01 mm, com a finalidade de serem obtidas as dimensões reais das respetivas secções transversais e ser calculada a tensão longitudinal última. O módulo de elasticidade foi determinado de acordo com a ISO 527-5:2009 sendo obtido pelo declive da reta definida entre as extensões de 0.05% e 0.25% na curva experimental tensão *versus* extensão.

Na Tabela 3.8, são apresentadas as principais propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de caracterização dos laminados de CFRP. A título exemplificativo, a Figura 3.15 apresenta a resposta típica em termos de relação tensão *versus* extensão, obtida nos ensaios de caracterização de uma das amostras de laminado de secção 100×1.2 mm².

Tabela 3.8 - Propriedades mecânicas dos laminados de CFRP utilizados no programa experimental.

Secção transversal do laminado (largura × espessura) [mm²]	Resistência de tração [MPa]	Módulo de Elasticidade [GPa]	Extensão última [%]
10×1.4 (L10)	2305.0 (2.0%)	164.8 (2.5%)	1.4 (2.7%)
20×1.4 (L20)	2784.0 (3.9%)	161.8 (0.9%)	1.7 (3.0%)
50×1.2 (L50)	2222.4 (4.7%)	176.4 (2.0%)	1.2 (2.2%)
80×1.2 (L80)	2428.0 (4.6%)	170.5 (0.3%)	1.5 (6.7%)
100×1.2 (L100)	2480.2 (4.0 %)	169.4 (1.4%)	1.4 (1.6%)

Nota: os valores entre parêntesis representam o coeficiente de variação (CoV).

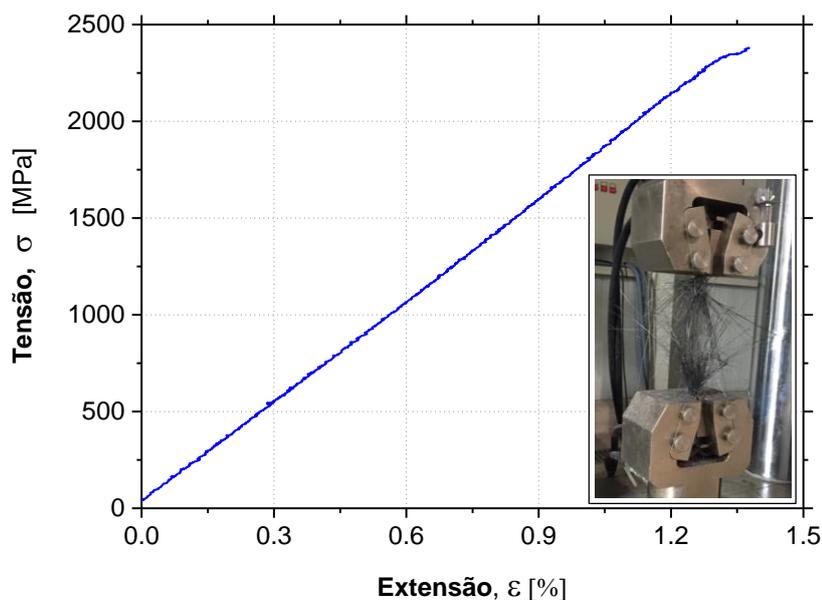


Figura 3.15 - Resposta típica obtida em termos de tensão *versus* extensão para uma amostra de laminado de CFRP L100.

3.4.4 Adesivo epóxi

O adesivo epoxídico utilizado no reforço dos provetes da presente investigação experimental foi fornecido pela mesma empresa que produz os laminados de CFRP e tem a designação comercial de “S&P Resin 220 epoxy adhesive®”. Este é o responsável pela ligação entre os laminados de CFRP e o substrato de betão. O adesivo é constituído por duas componentes (Componente A – Resina e Componente B – Endurecedor), que são misturadas até ser obtida uma solução homogénea. Segundo as recomendações do fabricante, a proporção de mistura do componente A em relação ao componente B é de 4:1. De acordo com a ficha técnica disponibilizada pelo fabricante, após a mistura dos dois componentes, a densidade da solução homogeneizada está compreendida entre 1.7 a 1.8 g/cm³ e com as seguintes propriedades mecânicas: módulo de elasticidade em tração superior a 7.10 GPa, resistência da ligação ao betão ou laminado de CFRP superior a 3 MPa (após 3 dias de cura a 20 °C), resistência à compressão superior a 70 MPa e resistência ao corte superior a 26 MPa. A temperatura recomendada à sua aplicação está entre +10 °C e +35 °C.

A Tabela 3.9 apresenta as propriedades mecânicas do adesivo epóxi utilizado no presente trabalho. A determinação das propriedades mecânicas foi estabelecida através de ensaios de

tração, de acordo com as recomendações da ISO 527-2:2012, embora não tenha sido realizada no âmbito deste trabalho, devido ao facto da caracterização do mesmo adesivo ter sido já efetuada em investigações anteriores (Fernandes *et al.*, 2015).

Tabela 3.9 - Propriedades mecânicas do adesivo epóxi utilizado no programa experimental.

Propriedade	S&P Resin 220 epoxy adhesive®
Resistência à tração [MPa]	22 ⁽¹⁾
Módulo de elasticidade [GPa]	7.15 ⁽¹⁾
Extensão máxima [%]	0.36 ⁽¹⁾

Notas: ⁽¹⁾Dados extraídos de Fernandes *et al.* (2015).

3.5 Preparação dos provetes de betão

A Figura 3.16 apresenta um esquema das principais etapas que constituíram o processo de preparação dos provetes de betão estudados no âmbito do presente trabalho de investigação experimental. Posteriormente, cada uma das fases será explicada em maior detalhe.

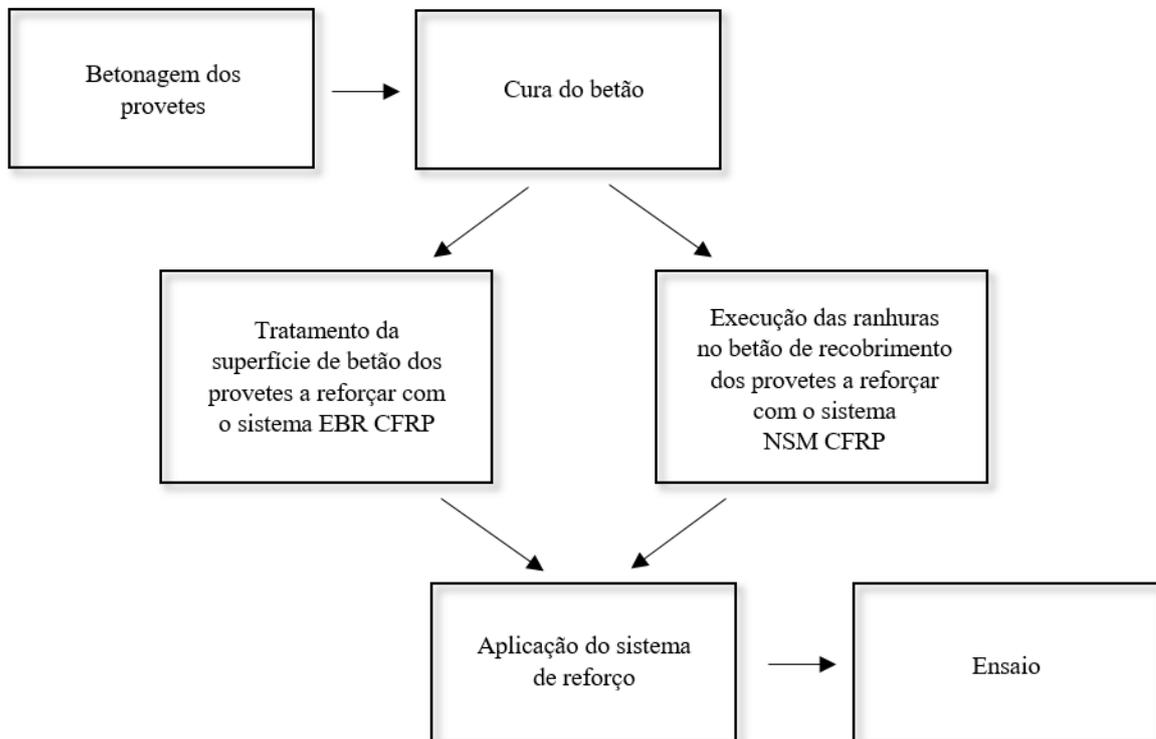


Figura 3.16 - Principais etapas do processo de preparação dos provetes de ensaio.

3.5.1 Betonagem

A betonagem dos provetes constituiu a primeira etapa do processo de preparação. Tal como já foi apresentado neste documento, dois diferentes tipos de provetes de betão foram produzidos: (i) 12 provetes prismáticos de dimensões $200 \times 200 \times 400 \text{ mm}^3$ e (ii) 7 faixas de laje de dimensões $600 \times 120 \times 2600 \text{ mm}^3$. Adicionalmente, foram também betonados provetes cilíndricos com o mesmo betão que constitui cada tipo de provete de ensaio, de modo a proceder-se à respetiva caracterização mecânica.

3.5.1.1 Provetes prismáticos

O processo de betonagem dos provetes prismáticos e dos respetivos cilindros para caracterização do betão é apresentado na Figura 3.17. Inicialmente foram preparadas as cofragens em madeira (ver Figura 3.17 (a)) seguindo-se a fase da betonagem dos provetes (ver Figura 3.17 (b), (c), (d) e (e)). Ao terceiro dia após a betonagem, procedeu-se à descofragem dos elementos de betão que apresentavam o aspeto patente na Figura 3.17 (f).



(a)



(b)

Figura 3.17 - Processo de betonagem dos provetes prismáticos: (a) preparação das cofragens e aplicação do óleo descofrante; (b), (c), (d) e (e) betonagem; (f) provetes curados após descofragem.



(c)



(d)



(e)

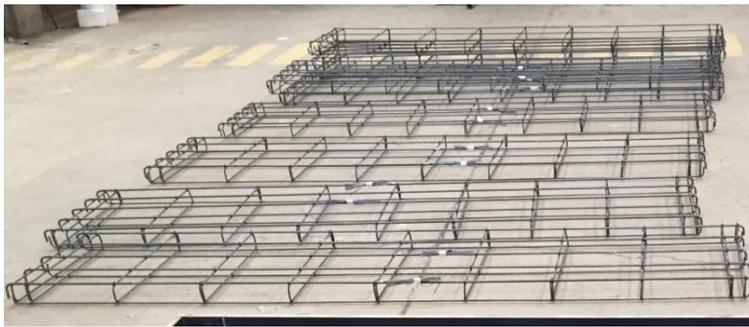


(f)

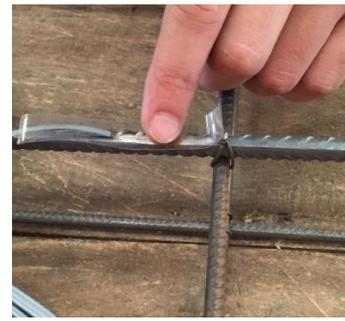
Figura 3.17 (cont.) - Processo de betonagem dos provetes prismáticos: (a) preparação das cofragens e aplicação do óleo descofrante; (b), (c), (d) e (e) betonagem; (f) provetes curados após descofragem.

3.5.1.2 Faixas de laje

O processo de betonagem das faixas de laje e dos respetivos cilindros para caracterização do betão encontra-se apresentado na Figura 3.18. Inicialmente foram produzidas as armaduras que constituem o reforço das faixas de laje, às quais foram instalados os extensómetros (ver Figura 3.18 (a) e (b)). Em simultâneo, foram preparadas as cofragens de madeira para a betonagem das faixas de laje (ver Figura 3.18 (c)). Em seguida, todos os provetes foram betonados (ver Figura 3.18 (d), (e), (f) e (g)). Ao terceiro dia após a betonagem, procedeu-se à descofragem de todos os provetes, apresentando o aspeto observado na Figura 3.18 (h).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.18 - Processo de betonagem das faixas de laje: (a) produção das armaduras para as faixas de laje; (b) aplicação de extensómetros nas armaduras; (c) preparação das cofragens, aplicação do óleo descofrante e colocação das armaduras; (d), (e), (f) e (g) betonagem; (h) provetes curados após descofragem.



Figura 3.18 (cont.) - Processo de betonagem das faixas de laje: (a) produção das armaduras para as faixas de laje; (b) aplicação de extensómetros nas armaduras; (c) preparação das cofragens, aplicação do óleo descofrante e colocação das armaduras; (d), (e), (f) e (g) betonagem; (h) provetes curados após descofragem.

3.5.2 Tratamento da superfície de betão

Na investigação experimental realizada no presente trabalho, uma das técnicas de reforço utilizadas e estudadas foi a técnica EBR, onde os laminados de CFRP são colados superficialmente nos elementos de betão com recurso a um adesivo epoxídico. Assim, a rugosidade da superfície onde o laminado é aplicado constitui um parâmetro importante que influencia diretamente o desempenho da ligação CFRP-betão. Desse modo, em todos os provetes reforçados de acordo com esta técnica procedeu-se ao tratamento superficial do betão que permitisse tornar a superfície mais adequada em termos de sanidade e rugosidade.

Nos provetes prismáticos, de acordo com o plano de ensaios já apresentado, dois diferentes tratamentos de superfície foram utilizados: (i) tratamento com esmeril (*Grinding*) recorrendo a uma mó de pedra, até ficarem visíveis os agregados, e (ii) tratamento com jato de areia (*Sand blasting*), os quais estão respetivamente apresentados na Figura 3.19 (a) e (b). Relativamente às faixas de laje, foi aplicado um tratamento superficial com recurso a jato de areia naquelas cuja técnica de reforço utilizada foi a EBR (ver Figura 3.19 (c)). Após o tratamento superficial, todos os resíduos foram extraídos da superfície tratada, recorrendo a ar comprimido (ver Figura 3.19 (d)).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.19 - Tratamento da superfície de betão dos provetes de ensaio: (a) tratamento com esmeril em provetes prismáticos; (b) tratamento com jato de areia em provetes prismáticos; (c) tratamento com jato de areia em faixas de laje; (d) limpeza de todos os provetes com recurso a ar comprimido.

3.5.3 Execução de ranhuras no betão

O processo de abertura das ranhuras nas faixas de laje reforçadas com o sistema NSM CFRP, realizou-se na empresa Artecanter – Indústria Criativa Lda. Na Figura 3.20 é apresentado este processo, que recorre a uma máquina de corte de elevada precisão para que seja obtida a largura e a profundidade desejada. Com a finalidade de remover poeiras e resíduos provenientes do processo de corte, procedeu-se à limpeza com jato de água de todas as ranhuras executadas.



Figura 3.20 - Abertura de ranhuras onde os laminados de CFRP são introduzidos, de acordo com a técnica NSM.

As dimensões médias das ranhuras foram analisadas de modo a avaliar a precisão da sua execução. Estas medições foram realizadas com recurso a um paquímetro digital (precisão de ± 0.01 mm) e foram retirados valores de largura e profundidade em 5 secções distintas, em cada uma das ranhuras executadas. Na Tabela 3.10 são apresentados os resultados das medições efetuadas.

Tabela 3.10 - Dimensões médias das ranhuras onde os laminados de CFRP foram introduzidos, de acordo com a técnica NSM.

Dimensão	Faixas de Laje	
	Secção da ranhura [mm ²]	
	5×25	5×15
Largura (w_g)	4.99 (2.51%)	4.84 (2.94%)
Profundidade (d_g)	25.85 (1.52%)	15.41 (2.74%)

Nota: os valores entre parêntesis representam o coeficiente de variação (CoV).

3.5.4 Aplicação do sistema de reforço

O reforço dos provetes prismáticos, associados aos ensaios de arranque direto, foi realizado em duas fases: primeiro uma face e após a cura deste, foi aplicado outro CFRP na face oposta. Por sua vez, o reforço nas faixas de laje foi aplicado de uma só vez. O reforço de todos os provetes de ensaio decorreu no laboratório de estruturas da Universidade do Minho (LEST). A aplicação do sistema de reforço dos provetes prismáticos, para os ensaios de arranque direto, foi realizada

a uma temperatura média ambiente de 24.8 °C e humidade relativa de 55%. Por sua vez, no reforço das faixas de laje, o sistema NSM CFRP foi instalado a uma temperatura média ambiente de 22.3 °C e humidade relativa de 55.5%. Finalmente, nas lajes reforçadas com o sistema EBR CFRP, o reforço foi instalado a uma temperatura média ambiente de 18.7 °C e humidade relativa de 53.6 %. Todas as fases que constituem o processo de aplicação do sistema de reforço, recorrendo a cada uma das referidas técnicas, foram explicitadas no Capítulo 2 do presente documento e serão em seguida detalhadas e ilustradas.

3.5.4.1 Técnica EBR

Previamente à instalação do sistema EBR CFRP, alguns trabalhos preparatórios foram realizados de forma a possibilitar uma execução de reforço de maior qualidade e precisão. Inicialmente, todas as áreas superficiais onde posteriormente viria a ser instalado o sistema de reforço foram isoladas com fita adesiva de papel de modo a ser evitada a existência de adesivo em áreas circundantes à zona de ancoragem objeto de estudo (ver Figura 3.21 (a) e (b)). Esta fita adesiva foi removida algumas horas depois da aplicação do reforço. Além disso, todas as superfícies de betão (após o tratamento superficial) foram novamente limpas com recurso a ar comprimido de forma a remover qualquer resíduo sólido que prejudicasse a aderência do sistema (ver Figura 3.21 (c) e (d)). Em seguida, sendo os laminados de CFRP disponibilizados pelo fabricante em rolos, estes foram cortados com os comprimentos pretendidos, recorrendo a uma máquina de corte (ver Figura 3.21 (e)), seguindo-se a sua limpeza com acetona (ver Figura 3.21 (f)). No caso dos provetes prismáticos, associados aos ensaios de arranque direto, foram coladas pequenas chapas metálicas na extremidade do laminado de modo a garantir a correta fixação da garra durante o ensaio (ver Figura 3.21 (g)).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 3.21 - Trabalhos preparatórios (antes do reforço): (a) e (b) isolamento da zona de ancoragem com fita adesiva de papel nos provetes prismáticos e faixas de laje, respetivamente; (c) e (d) limpeza da superfície de ancoragem com ar comprimido, nos provetes prismáticos e nas faixas de laje, respetivamente; (e) corte dos laminados; (f) limpeza dos laminados com acetona; (g) colagem das chapas metálicas na extremidade dos laminados utilizados no reforço dos provetes prismáticos.



(g)

Figura 3.21 (cont.) - Trabalhos preparatórios (antes do reforço): (a) e (b) isolamento da zona de ancoragem com fita adesiva de papel nos provetes prismáticos e faixas de laje, respetivamente; (c) e (d) limpeza da superfície de ancoragem com ar comprimido, nos provetes prismáticos e nas faixas de laje, respetivamente; (e) corte dos laminados; (f) limpeza dos laminados com acetona; (g) colagem das chapas metálicas na extremidade dos laminados utilizados no reforço dos provetes prismáticos.

Concluídos os trabalhos preparatórios, foi instalado o sistema EBR CFRP nos provetes prismáticos e em faixas de laje, tal como é ilustrado na Figura 3.22. Em primeiro lugar procedeu-se à pesagem dos componentes que constituem o adesivo epoxídico de acordo com as recomendações do fabricante (ver Figura 3.22 (a)), seguindo-se a sua mistura (ver Figura 3.22 (b)). O adesivo foi em seguida aplicado na superfície dos laminados de CFRP, através do sistema apresentado na Figura 3.22 (c), que garantia que a espessura de adesivo aplicado fosse a adequada. As superfícies de betão dos provetes de ensaio foram também cobertas com adesivo (ver Figura 3.22 (d) e (e)). Após a aplicação manual e ajuste dos laminados de CFRP na superfície de betão (ver Figura 3.22 (f)), foi removido o adesivo em excesso (ver Figura 3.22 (g)). Por fim, foi exercida pressão sob os laminados contra a superfície de betão tal como é ilustrado na Figura 3.22 (h).



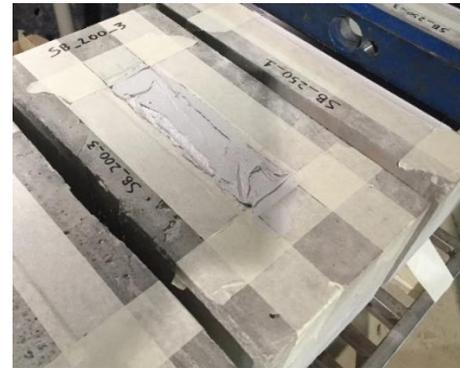
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 3.22 - Execução do reforço: (a) pesagem dos componentes A e B do adesivo; (b) mistura dos dois componentes do adesivo; (c) aplicação do adesivo na superfície do laminado; (d) e (e) aplicação do adesivo na superfície dos provetes prismáticos e faixas de laje, respetivamente; (f) aplicação manual e ajuste do laminado na superfície dos provetes; (g) remoção do adesivo em excesso; (h) pressão exercida sob os laminados contra a superfície de betão.



(f)



(g)



(h)

Figura 3.22 (cont.) - Execução do reforço: (a) pesagem dos componentes A e B do adesivo; (b) mistura dos dois componentes do adesivo; (c) aplicação do adesivo na superfície do laminado; (d) e (e) aplicação do adesivo na superfície dos provetes prismáticos e faixas de laje, respetivamente; (f) aplicação manual e ajuste do laminado na superfície dos provetes; (g) remoção do adesivo em excesso; (h) pressão exercida sob os laminados contra a superfície de betão.

Após a aplicação do sistema de reforço, todos os provetes foram pintados com tinta branca de modo a possibilitar uma eventual identificação de fendas que pudessem surgir durante a realização dos ensaios (ver Figura 3.23). Finalizadas todas estas etapas, foi instalada toda a instrumentação de ensaio (incluindo extensómetros na superfície do laminado) e todas as condições estavam reunidas para a sua inicialização.

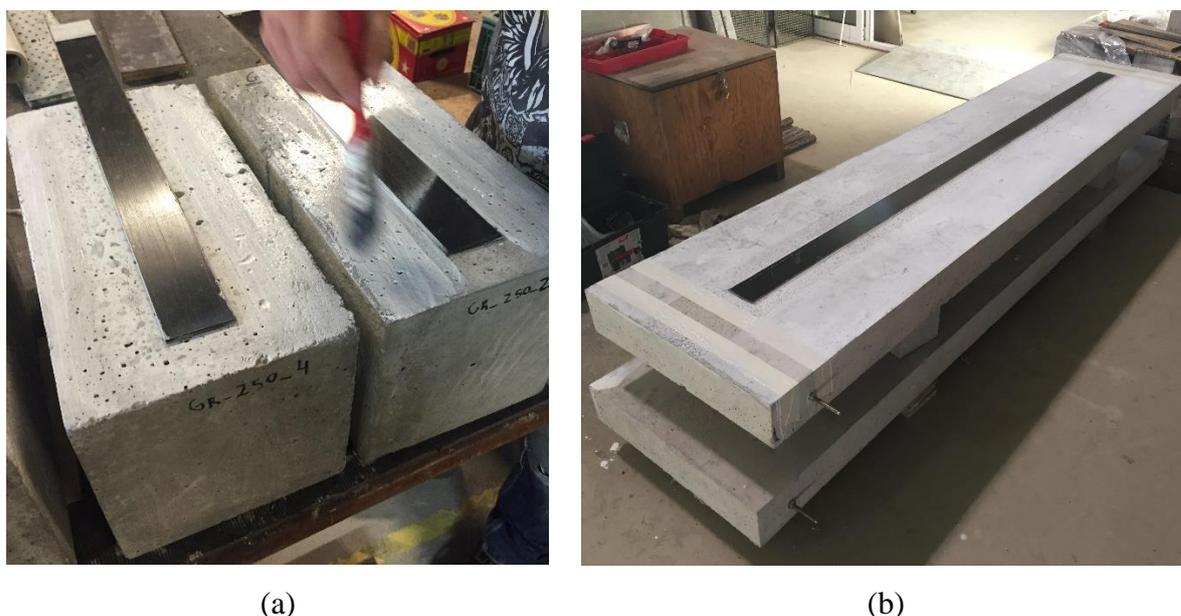


Figura 3.23 - Provetes de ensaio reforçados com o sistema EBR, após a pintura da superfície para identificação de fendas: (a) provetes prismáticos; (b) faixas de laje.

3.5.4.2 Técnica NSM

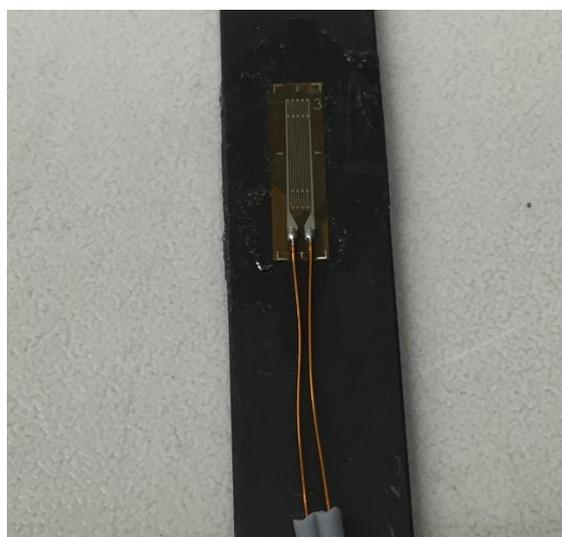
Tal como na aplicação da técnica EBR, quando aplicada a técnica NSM é exigida a realização de alguns trabalhos precedentes à instalação do reforço, alguns deles comuns em ambas as técnicas. Após a abertura das ranhuras nas faixas de laje (ver Figura 3.20), estas foram transportadas para as instalações da Universidade do Minho, onde o sistema de reforço foi aplicado. Inicialmente todas as ranhuras executadas foram limpas com recurso a ar comprimido (ver Figura 3.24 (a)). De forma a evitar a existência de adesivo nas zonas circundantes às ranhuras, essas zonas foram isoladas com fita adesiva de papel (ver Figura 3.24 (b)). O comprimento de ancoragem dos laminados de CFRP, foi também marcado nos provetes de ensaio, para possibilitar o seu posicionamento e valor corretos. Em seguida, procedeu-se ao corte e limpeza dos laminados de CFRP tal como foi apresentado na Figura 3.21 (e) e (f). Como os laminados são introduzidos no interior das ranhuras pré-executadas, anteriormente à sua colocação, são instalados os extensómetros na sua superfície (ver Figura 3.24 (c)). Para assegurar o correto posicionamento do laminado na ranhura, isto é, que este fique perfeitamente centrado em profundidade, foram aplicadas umas peças de latex que também impedem que o adesivo possa fluir para além do comprimento de ancoragem desejado (ver Figura 3.24 (d)).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.24 - Trabalhos preparatórios (antes do reforço): (a) limpeza das ranhuras com ar comprimido; (b) isolamento das zonas circundantes das ranhuras; (c) colocação de extensómetros na superfície do laminado; (d) aplicação dos delimitadores do comprimento de ancoragem.

Após a pesagem dos componentes que constituem o adesivo epoxídico e da sua mistura, as ranhuras pré-executadas foram completamente preenchidas com este (ver Figura 3.25 (a)). Posteriormente, as superfícies do laminado foram também revestidas com adesivo e estes foram inseridos nas respetivas ranhuras (ver Figura 3.25 (b)). Com o laminado já inserido, a superfície foi regularizada com a remoção do excesso de adesivo nas zonas circundantes das ranhuras (ver

Figura 3.25 (c)). Duas das lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP são apresentadas na Figura 3.25 (d).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.25 - Execução do reforço: (a) aplicação do adesivo no interior das ranhuras; (b) inserção do laminado nas ranhuras após ter sido revestido com adesivo; (c) remoção do excesso de adesivo e regularização da superfície com a espátula; (d) lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP.

Finalmente, os provetes foram pintados, tal como os provetes reforçados com a técnica EBR, de modo a facilitar a identificação de fendas. A Figura 3.26 apresenta uma das lajes reforçadas

com o sistema NSM CFRP após o reforço e pintura da superfície. Cumpridas todas estas etapas, foi instalada a restante instrumentação de ensaio e procedeu-se à sua realização.



Figura 3.26 - Faixa de laje reforçada com sistema NSM, após a pintura da superfície para identificação de fendas.

CAPÍTULO 4

ENSAIOS DE ARRANQUE DIRETO: RESULTADOS E DISCUSSÃO

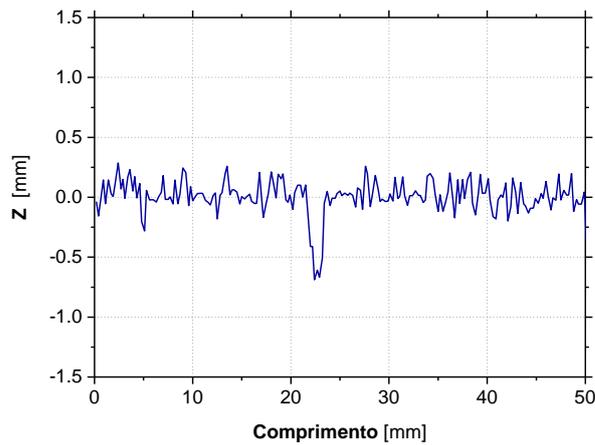
De modo a caracterizar o comportamento da ligação entre o laminado de CFRP e a superfície de betão, quando utilizada a técnica EBR, foi realizado um programa experimental constituído por 24 ensaios de arranque direto recorrendo a 12 provetes prismáticos reforçados em duas faces opostas. A geometria dos provetes de betão, a configuração de ensaio bem como toda a sua instrumentação, foram detalhadamente apresentados no Capítulo 3 da presente dissertação. O estudo teve como principal objetivo avaliar o desempenho da ligação entre o laminado de CFRP e o betão quando diferentes técnicas de tratamento de superfície são aplicadas, previamente à instalação do sistema EBR CFRP. Assim, foram distinguidas duas séries de ensaio, de acordo com a técnica de preparação utilizada: (i) tratamento com esmeril, onde se recorreu a uma mó de pedra até se tornarem visíveis os agregados (GR – *Grinding*) e (ii) tratamento com jato de areia (SB – *Sand Blasting*). De modo a avaliar a eficiência de cada um dos processos de tratamento e estabelecer uma relação com o desempenho da ligação entre laminado e betão, foi medido o nível de rugosidade de todas as superfícies, onde viria a ser instalado o sistema EBR CFRP, através da utilização de um sensor laser que permitiu retirar informações qualitativas e quantitativas da rugosidade das diferentes superfícies. O sistema de medição da rugosidade de superfície bem como as características do sensor utilizado, foram também apresentados no Capítulo 3. Em complementaridade aos diferentes tratamentos de superfície, outro parâmetro estudado no programa experimental foi o comprimento de ancoragem (L_b) adotado na instalação do sistema EBR CFRP, de modo a ser avaliada a sua influência na resistência da ligação CFRP-betão. Assim, por série de ensaios, foram adotados três distintos comprimentos de ancoragem (L_b): 150, 200 e 250 mm. Um conjunto de 4 ensaios foram realizados nas mesmas condições, isto é, mesmo processo de tratamento superficial e mesmo comprimento de ancoragem. Os ensaios monotónicos de caracterização da aderência foram realizados sob controlo de deslocamento na extremidade carregada segundo a configuração apresentada no Capítulo 3. A instrumentação utilizada permitiu obter a relação entre a força de arranque e o deslizamento do laminado de CFRP ao nível da extremidade carregada e ao nível da extremidade livre, ao longo do ensaio.

No presente capítulo, os principais resultados obtidos nos ensaios de arranque direto serão apresentados e discutidos em complementaridade com a análise da influência dos vários parâmetros estudados.

4.1 Caracterização da rugosidade da superfície de betão

Considerando as duas diferentes metodologias de preparação da superfície de betão (GR e SB) aplicadas nos provetes prismáticos da presente investigação e, de modo a identificar a sua influência nos resultados obtidos nos ensaios de arranque direto, foi medida a rugosidade da superfície de ancoragem de todos os provetes através da utilização de um sensor laser, previamente à instalação do sistema EBR CFRP. O procedimento de medição da rugosidade e as características do sensor utilizado foram detalhadamente apresentados no Capítulo 3 deste documento. Foram analisados três perfis longitudinais na zona de ancoragem, onde posteriormente seria instalado o sistema EBR CFRP, em cada uma das superfícies dos provetes.

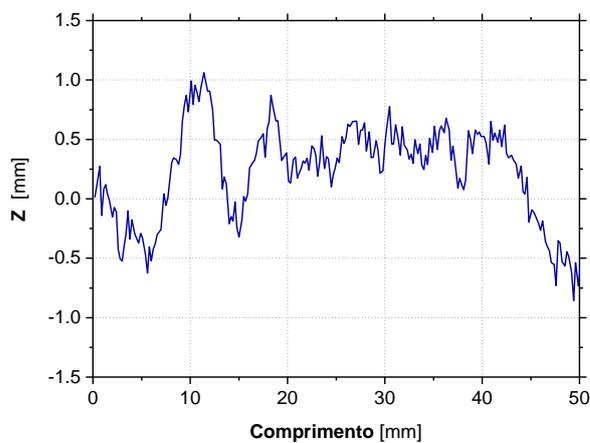
Na Figura 4.1, são apresentados dois perfis representativos das diferentes superfícies (GR e SB) ao longo de um comprimento de 50 mm, quando utilizadas as diferentes técnicas de tratamento. Os resultados das medições de rugosidade, ao longo do perfil longitudinal central do comprimento de ancoragem de cada uma das 24 superfícies de betão, encontram-se no ANEXO I. A Figura 4.1 claramente evidencia o nível de rugosidade proporcionado por cada metodologia de tratamento superficial. De facto, a preparação com jato de areia permitiu que a superfície apresentasse um nível de rugosidade superior relativamente à superfície onde o tratamento com esmeril foi aplicado, tal como seria expectável a partir da análise visual das superfícies após aplicadas as duas metodologias (ver Figura 4.1 (a2) e (b2)).



(a1)



(a2)



(b1)



(b2)

Figura 4.1 - Diferentes níveis de rugosidade das superfícies de betão (perfil de rugosidade obtido pelo laser e foto da superfície): (a) tratamento com esmeril (GR); (b) tratamento com jato de areia (SB).

De modo a caracterizar quantitativamente o nível de rugosidade apresentado por cada uma das superfícies após a aplicação do tratamento, foram aplicados vários indicadores estatísticos aos resultados das medições da rugosidade ao longo do perfil longitudinal central monitorizados pelo sensor laser. Os indicadores utilizados foram os seguintes: (i) a rugosidade média (R_m), (ii) o valor quadrático médio da rugosidade (R_q), (iii) a profundidade máxima do perfil (R_v), (iv) a altura máxima do perfil (R_p) e (v) a diferença entre altura máxima e a profundidade máxima do perfil (R_t).

A rugosidade média do perfil (R_m), foi calculada de acordo com as recomendações de Model Code (2010), onde foram aplicadas as equações (4.1) e (4.2). Relativamente ao valor quadrático médio da rugosidade (R_q), este foi calculado de acordo com a equação (4.3). Nas referidas

equações, os parâmetros l , $z(x)$ e n representam o comprimento de avaliação da rugosidade, a altura do perfil na posição x e o número de leituras efetuadas pelo sistema de medição, respetivamente. Estes e os restantes parâmetros utilizados na caracterização da rugosidade têm vindo a ser utilizados por outros investigadores, como no caso do trabalho realizado por Correia *et al.* (2015).

$$R_m = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x) - \bar{z}| \cdot dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i - \bar{z}| \quad (4.1)$$

$$\bar{z} = \frac{1}{l} \int_0^l z(x) \cdot dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z(x) \quad (4.2)$$

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (4.3)$$

Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados da caracterização da rugosidade da superfície dos provetes prismáticos que constituem o presente programa experimental, após terem sido aplicados os indicadores estatísticos mencionados anteriormente. Na Figura 4.2, a comparação entre o valor dos parâmetros R_m e R_q proporcionado pelos diferentes tratamentos de superfície, é apresentada. Os resultados da aplicação de cada indicador, foram obtidos pela média dos resultados dos quatro provetes que se encontram nas mesmas condições de ensaio (mesmo tratamento superficial e igual comprimento de ancoragem). No ANEXO I encontram-se detalhadamente apresentados os resultados da caracterização da rugosidade da totalidade das superfícies. Analisando os resultados obtidos é possível confirmar que, tal como tinha sido verificado com a análise visual das superfícies, a aplicação do jato de areia permitiu obter níveis de rugosidade consideravelmente superiores aos obtidos quando aplicado o tratamento com esmeril. Em termos de rugosidade média (R_m) e de valor quadrático médio (R_q), este permitiu um aumento médio de 250% e 150%, respetivamente, em relação à preparação da superfície com esmeril. Quanto aos valores de profundidade máxima (R_v) e altura máxima do perfil (R_p), com tratamento de jato de areia também se obtiveram valores de maior ordem de grandeza, o que fez com que a diferença entre a altura máxima e profundidade máxima do perfil (R_t) fosse

56% superior quando aplicado este tratamento de superfície. Um aspeto importante realçar, é o facto de os valores obtidos de coeficiente de variação (CoV) serem por vezes significativos, o que reflete a dificuldade de obtenção de um nível de rugosidade superficial uniforme. Este está muito dependente da habilidade e da experiência humana na execução da técnica de tratamento superficial, o que se torna um aspeto crítico quando se produzem provetes nas mesmas condições de ensaio, onde, teoricamente, os mesmos níveis de rugosidade seriam desejados.

Tabela 4.1 - Resultados da caracterização da rugosidade da superfície.

Provete	Parâmetros de caracterização da rugosidade [mm]				
	R_m	R_q	R_v	R_p	R_t
GR_Lb150	0.137 (21.8%)	0.260 (32.7%)	-1.958 (49.6%)	0.355 (4.5%)	2.313 (42.2%)
GR_Lb200	0.120 (10.3%)	0.181 (11.5%)	-1.297 (36.0%)	0.362 (13.5%)	1.659 (25.4%)
GR_Lb250	0.165 (13.4%)	0.329 (29.4%)	-2.345 (48.3%)	0.498 (24.9%)	2.843 (39.9%)
Média	0.141	0.256	-1.867	0.405	2.271
SB_Lb150	0.533 (17.9%)	0.655 (21.8%)	-1.814 (38.1%)	1.311 (25.5%)	3.125 (26.8%)
SB_Lb200	0.460 (14.8%)	0.570 (9.4%)	-1.965 (14.2%)	1.273 (28.7%)	3.239 (7.2%)
SB_Lb250	0.491 (31.1%)	0.691 (32.7%)	-3.079 (55.5%)	1.167 (26.8%)	4.246 (43.7%)
Média	0.494	0.639	-2.286	1.251	3.537

Nota: os valores entre parêntesis representam o coeficiente de variação (CoV).

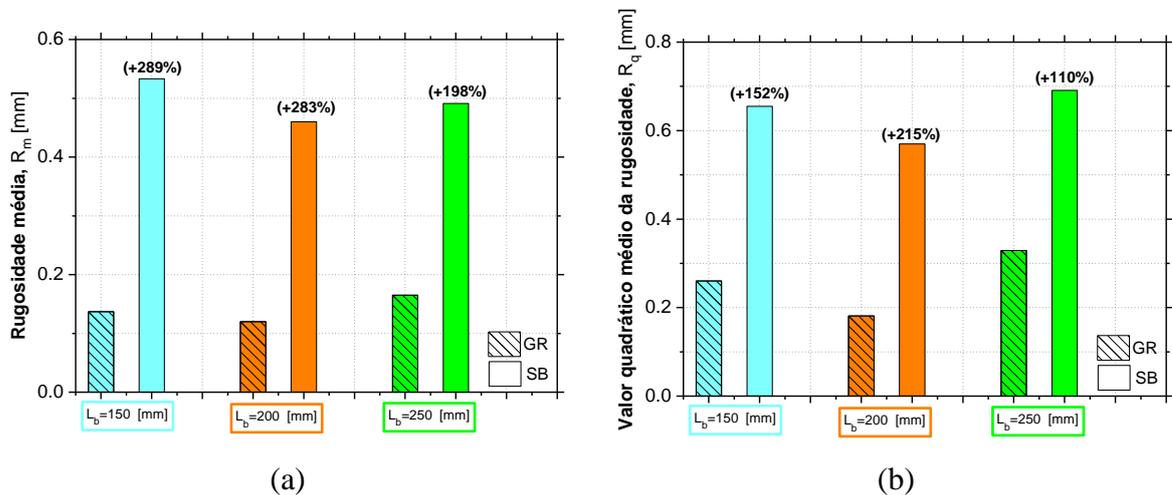


Figura 4.2 - Comparação do nível de rugosidade proporcionado por cada tratamento de superfície (GR e SB) em termos de: (a) rugosidade média (R_m); (b) valor quadrático médio da rugosidade (R_q).

Nota: os valores entre parêntesis representam o aumento percentual do respetivo parâmetro de caracterização da rugosidade, quando utilizado o tratamento de superfície com jato de areia em relação ao tratamento com esmeril, em provetes de igual comprimento de ancoragem.

4.2 Síntese dos resultados obtidos nos ensaios de arranque direto

Nesta secção são apresentados os principais resultados obtidos no programa de ensaios de arranque direto realizado. Na Tabela 4.2, apresentam-se os resultados obtidos através de vários parâmetros que caracterizam o comportamento da ligação entre o laminado de CFRP e a superfície de betão. Os valores apresentados correspondem à média dos valores obtidos num conjunto de quatro provetes ensaiados nas mesmas condições, mais concretamente, onde a superfície de betão foi sujeita ao mesmo processo de preparação e onde o comprimento de ancoragem (L_b) adotado é igual. A totalidade dos resultados obtidos, isto é, por provete, encontra-se apresentada no ANEXO II. Na referida tabela, $F_{l,max}$ traduz a força de arranque máxima registada enquanto que $s_{l,max}$ e $s_{f,max}$ representam, respetivamente, o deslizamento na extremidade carregada e livre para $F_{l,max}$. Os valores de $s_{l,max}$ e $s_{f,max}$ foram obtidos através da média dos valores de deslizamento registados pelos dois LVDT's colocados em cada uma das extremidades do comprimento de ancoragem, respetivamente, tal como foi apresentado no Capítulo 3. Por sua vez, τ_{max} traduz a tensão tangencial média na interface entre o laminado de CFRP e a superfície de betão, sendo esta determinada pela razão entre o $F_{l,max}$ e a totalidade da área de superfície ancorada ($b_f \times L_b$). O parâmetro G_f traduz a energia dissipada e é representado pela área sob a curva força de arranque (F_l) *versus* deslizamento na extremidade carregada (s_l) até um deslizamento de 0.3 mm. O parâmetro f_{fd} indica o valor médio da tensão de tração no laminado quando ocorre a rotura do sistema EBR CFRP e foi determinado pela divisão de $F_{l,max}$ pela área da secção transversal do laminado, A_f . Por fim, o parâmetro f_{fd}/f_{fu} traduz um fator de eficiência do sistema de reforço e foi obtido pelo rácio entre f_{fd} e a tensão de tração última do laminado obtida no ensaio de tração uniaxial, f_{fu} . Na mesma tabela, os modos de rotura observados nos ensaios estão também incluídos.

Tabela 4.2 - Resultados obtidos nos ensaios de arranque direto (valores médios).

Série	$F_{l,max}$ [kN]	$s_{l,max}$ [mm]	$s_{f,max}$ [mm]	τ_{max} [MPa]	G_f [kN.mm]	f_{fd} [MPa]	f_{fd}/f_{fu} [%]	MR
GR_Lb150	23.8 (6.9%)	0.34 (11.7%)	0.01 (38.3%)	3.2	5.08 (5.4%)	396.5	17.8	DB/C (4)
GR_Lb200	23.8 (4.7%)	0.34 (18.0%)	0.01 (57.3%)	2.4	5.37 (6.6%)	396.3	17.8	DB/C (4)
GR_Lb250	26.8 (7.9%)	0.35 (19.2%)	-	2.1	5.89 (6.2%)	446.8	20.1	DB/C (4)
SB_Lb150	27.2 (6.7%)	0.31 (12.5%)	0.01 (44.2%)	3.6	5.79 (3.0%)	453.1	20.4	DB/C (4)
SB_Lb200	30.2 (9.7%)	0.41 (8.2%)	0.01 (39.9%)	3.0	5.92 (3.7%)	503.3	22.6	DB/C (4)
SB_Lb250	31.3 (5.7%)	0.52 (24.0%)	-	2.5	6.07 (2.9%)	522.0	23.5	DB/C (4)

Notas: DB/C (4) = Rotura por destacamento do sistema EBR CFRP com remoção de uma camada de betão (rotura coesiva no betão), nos 4 provetes ensaiados nas mesmas condições; os valores entre parêntesis representam o respetivo coeficiente de variação (CoV).

Analisando o valor dos parâmetros apresentados na Tabela 4.2, é possível verificar que, no caso de $F_{l,max}$, a dispersão dos resultados é relativamente reduzida. Pelo contrário, em termos de $s_{l,max}$, os valores de dispersão calculados são significativamente mais elevados. O parâmetro que apresentou maior disparidade de resultados foi o $s_{f,max}$, o que está relacionado com o facto de os deslizamentos relativos na extremidade livre do comprimento de ancoragem serem muito reduzidos e de difícil quantificação com base no tipo de sensores de deslocamento utilizado, para além da intrínseca variabilidade da ligação.

Numa primeira análise dos resultados obtidos nos ensaios, é verificada uma significativa influência do processo de tratamento da superfície do betão no comportamento de aderência dos provetes de betão reforçados com o sistema EBR CFRP. A utilização de jato de areia demonstrou ser mais eficiente do que o tratamento que recorria a esmeril, permitindo aumentar a resistência da ligação à rotura por destacamento do laminado de CFRP, proporcionada pela maior rugosidade que a superfície de betão apresentava. Assim, quando adotado o mesmo comprimento de ancoragem (L_b), valores superiores de $F_{l,max}$ foram obtidos quando o método de tratamento da superfície foi o jato de areia. Apesar da maior dispersão de resultados, o deslizamento entre o laminado de CFRP e a superfície de betão na extremidade carregada ($s_{l,max}$), também demonstrou ser maior nos provetes em que se recorreu ao jato de areia, o que

seria previsível devido ao melhor comportamento de aderência apresentado pela ligação. O processo de tratamento de superfície também demonstrou influenciar consideravelmente os valores de energia dissipada (G_f) e de tensão tangencial média (τ_{\max}) obtidos, visto que valores superiores foram determinados nos provetes cuja superfície foi tratada com jato de areia. Apesar da rotura por destacamento do laminado de CFRP não permitir que este experimente tensões de tração próximas das que o levariam à rotura, quando se recorreu ao jato de areia no tratamento da sua superfície, valores superiores do parâmetro de eficiência (f_{fd}/f_{fu}) foram obtidos. Contudo, ficou demonstrada a incapacidade de aproveitar a capacidade resistente do laminado de CFRP, sendo que, no melhor dos casos (proвете SB_Lb250_4), apenas 26% da sua resistência à tração foi eficiente.

O comprimento de ancoragem (L_b) também demonstrou ser uma variável que influencia o comportamento da ligação entre o laminado de CFRP e a superfície de betão. Analisando os resultados obtidos quando o mesmo tratamento de superfície foi utilizado, foi verificado um aumento da resistência da ligação quando maiores valores de L_b foram adotados, traduzido pelo aumento da força de arranque necessária para provocar a rotura por destacamento do sistema EBR CFRP. Além disso, maiores valores de deslizamento na extremidade carregada do comprimento de ancoragem ($s_{l,\max}$) e de energia dissipada (G_f) foram obtidos quando se fez aumentar o valor de L_b . Contudo, devido à maior área de ligação entre o laminado e a superfície de betão, o aumento do comprimento de ancoragem fez diminuir o valor de tensão tangencial média (τ_{\max}), como seria expectável devido à distribuição de tensões de corte não uniforme ao longo do comprimento de ancoragem. Em termos de parâmetro de eficiência (f_{fd}/f_{fu}), o aumento de L_b permitiu obter uma melhor eficiência do sistema de reforço, permitindo que uma maior percentagem da capacidade resistente do laminado fosse mobilizada.

Na Figura 4.3 são apresentadas as curvas em termos de força de arranque (F_l) *versus* deslizamento na extremidade carregada (s_l), obtidas em todos os ensaios de arranque direto realizados na presente investigação. Em cada um dos gráficos apresentados estão agrupadas as respostas relativas aos quatro provetes ensaiados nas mesmas condições. Posteriormente, uma análise mais detalhada da influência das variáveis em estudo será realizada.

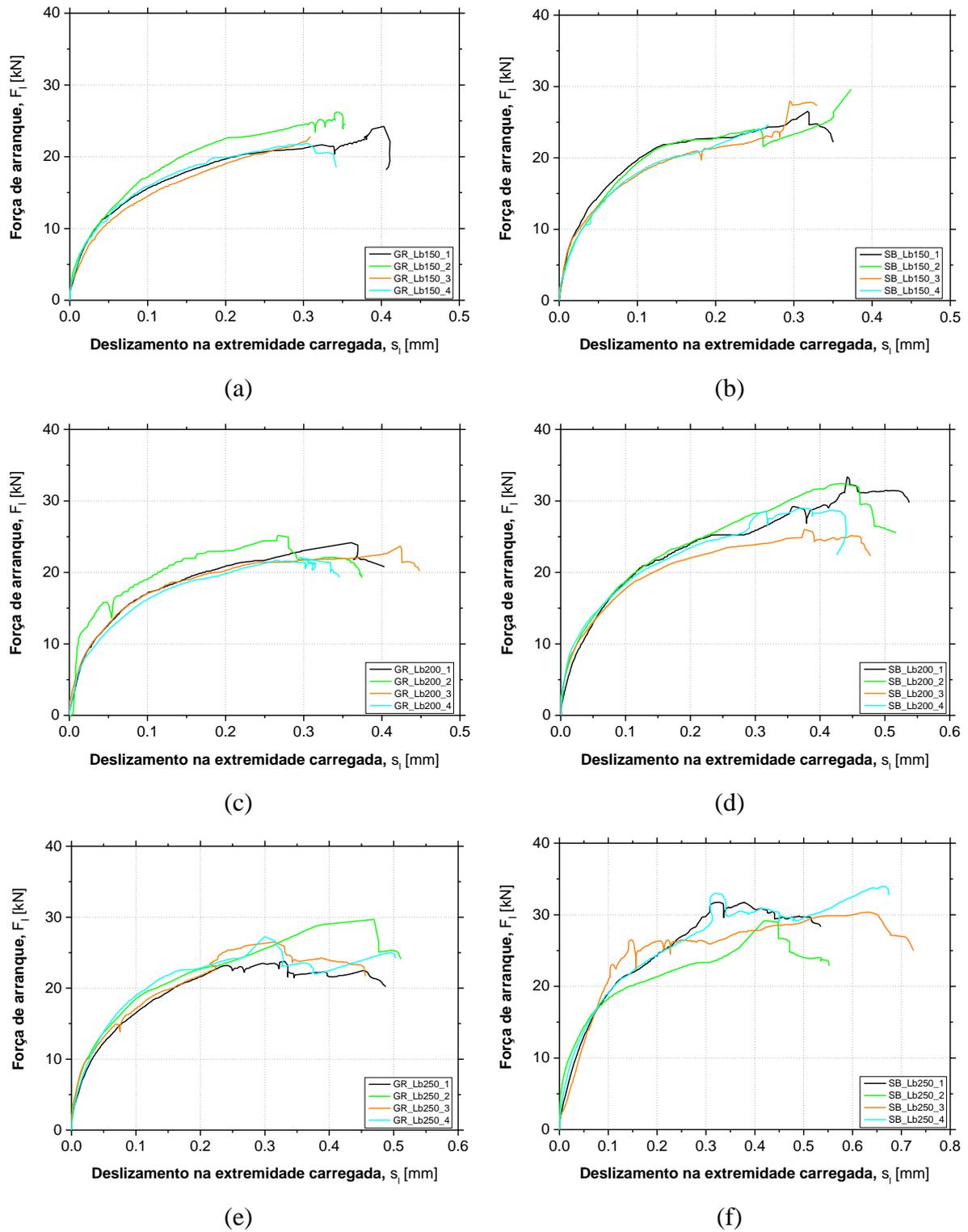


Figura 4.3 - Curvas força de arranque *versus* deslocamento na extremidade carregada: (a) GR_Lb150; (b) SB_Lb150; (c) GR_Lb200; (d) SB_Lb200; (e) GR_Lb250; (f) SB_Lb250.

Observando as curvas apresentadas, torna-se importante destacar que os provetes ensaiados nas mesmas condições apresentaram respostas semelhantes, à exceção de alguns onde existiu uma

maior dispersão relativamente aos restantes. Exemplos disso são os provetes GR_Lb150_2 e GR_Lb200_2, que apresentaram uma resposta mais rígida até ao início do processo de destacamento do laminado, em relação aos restantes provetes nas mesmas condições de ensaio.

Em termos gerais, é possível identificar dois comportamentos experimentais distintos em cada uma das curvas apresentadas. O primeiro ramo aproxima-se mais da linearidade, sem que sejam notadas quaisquer quedas ou aumentos abruptos da força de arranque aplicada. Esta fase ocorre desde o início do ensaio até que a força atinja aproximadamente 70% a 80% da máxima força de arranque monitorizada. A partir deste valor de força, começa a ser notável uma maior degradação da rigidez devido ao início do processo de destacamento do sistema de reforço. Este processo inicia-se quando a resistência ao corte máxima é atingida no início do comprimento de ancoragem, isto é, na extremidade carregada. Regra geral, durante este processo, verifica-se um aumento do deslizamento na extremidade carregada para valores de carga aplicada aproximadamente constantes. Contudo, em alguns casos, após o início deste processo, a força aplicada continua a aumentar, embora de forma menos acentuada, o que pode ser justificado por possíveis irregularidades geométricas dos prismas de betão ou, mais provavelmente, devido ao facto de a camada de betão, que após a rotura do sistema fica ligada ao laminado, atravessar um agregado mais grosso, o que significa que para aumentar o deslizamento seja requerida uma força de corte aplicada mais elevada (através ao nível da interface formada). Em estudos realizados pela comunidade científica nesta área de estudo, respostas semelhantes às apresentadas na Figura 4.3 têm sido obtidas, como no caso dos ensaios experimentais realizados por Savoia *et al.* (2007) e Bilotta *et al.* (2011).

4.3 Modos de rotura

Tal como foi apresentado na Tabela 4.2, o mecanismo de rotura observado em todos os ensaios de arranque realizados, independentemente da metodologia de preparação da superfície utilizada e do comprimento de ancoragem adotado, foi o destacamento do sistema EBR CFRP com remoção de uma fina camada de betão que, após a rotura, surgiu colada ao adesivo e ao laminado. Este coincide com os modos de rotura observados noutros trabalhos de investigação, tais como os levados a cabo por Iovinella *et al.* (2013).

Na Figura 4.4 é apresentado um esquema representativo do modo de rotura observado nos ensaios. Durante o processo de carregamento vão surgindo microfendas inclinadas numa pequena camada externa do betão devido ao facto de a sua resistência à tração ser inferior à do adesivo. Estas fendas inclinadas não se propagam mais do que alguns milímetros para o interior do provete por causa das tensões decrescerem muito rapidamente em profundidade a partir da interface FRP/betão (Savoia *et al.*, 2007). As fendas vão surgindo desde a extremidade carregada em direção à extremidade livre do comprimento de ancoragem, acompanhando o processo de destacamento do sistema EBR CFRP que se inicia quando a resistência da ligação é atingida. Durante este processo, a resistência da ligação vai sendo gradualmente perdida na zona carregada à medida que se vão propagando as fendas no betão e, ao mesmo tempo, zonas mais afastadas do carregamento vão sendo ativadas dando a sua contribuição na transferência de tensões (Mazzotti *et al.*, 2016). Assim que se dá o destacamento do sistema de reforço, nas sucessivas extremidades carregadas, a capacidade de essa secção distribuir tensões é nula. Esta é uma característica da técnica EBR que a distingue negativamente da técnica NSM. Nesta última, após o destacamento do sistema de reforço na extremidade carregada, devido ao efeito do confinamento promovido pelas superfícies das ranhuras em complementaridade com os mecanismos de fricção na interface FRP/adesivo, seria possível continuar a distribuir um valor residual de tensões, o que significa que aumentando o comprimento de ancoragem (L_b), seria sempre registado um aumento da força de arranque máxima ($F_{1,max}$) (Cruz, 2016).

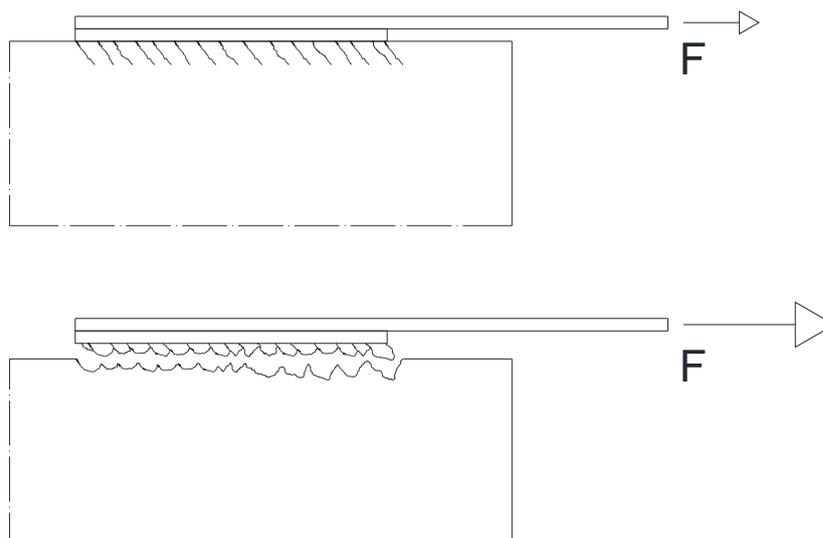


Figura 4.4 - Mecanismo de rotura observado nos ensaios de arranque direto. Adaptado de Savoia *et al.* (2007).

As características do mecanismo de rotura ocorrido explicam as razões pelas quais as propriedades do adesivo, a compatibilidade entre este e a superfície de betão e a preparação da superfície antes da sua aplicação, são aspetos muito importantes para ser possível aumentar a resistência ao destacamento do sistema EBR CFRP. Assim, analisando os mecanismos de rotura que ocorreram nos ensaios de arranque realizados, ilações podem ser retiradas quanto à influência da técnica de tratamento da superfície utilizada, visto que se recorreu ao mesmo adesivo epoxídico no reforço dos provetes prismáticos. Na Figura 4.5 e na Figura 4.6 são apresentadas duas superfícies de fratura representativas das que se obtiveram em todos os ensaios, quando utilizadas cada uma das metodologias de preparação da superfície de betão. Contudo, a totalidade das superfícies de fratura, correspondentes a cada um dos provetes ensaiados, encontram-se expostas no ANEXO III. De um ponto de vista qualitativo, a eficácia dos diferentes tratamentos de superfície utilizados pode ser avaliada através da análise visual das superfícies de fratura.

Quando à superfície de betão foi aplicado o jato de areia (ver Figura 4.5 (b) e Figura 4.6 (b)), uma camada mais espessa de betão surgiu colada ao laminado de CFRP após a rotura por destacamento do sistema. Pelo contrário, quando se recorreu a esmeril (ver Figura 4.5 (a) e Figura 4.6 (a)), uma porção mais fina de betão surgiu colada ao FRP, sendo que, em algumas zonas pontuais, verificou-se a sua inexistência. Um aspeto importante referir, é o facto de em alguns casos, após o destacamento do laminado de CFRP, não se ter observado uma camada de betão colada à sua superfície ao longo de todo o comprimento de ancoragem. Tal situação ocorreu principalmente quando utilizados maiores comprimentos de ancoragem (L_b) e quando foi aplicado jato de areia à superfície, podendo esta ser justificada pelo facto de o referido comprimento de ancoragem ser superior ao comprimento de ligação capaz de transferir tensões, denominado por comprimento ótimo de ancoragem (l_e). Este conceito será posteriormente abordado com maior detalhe.

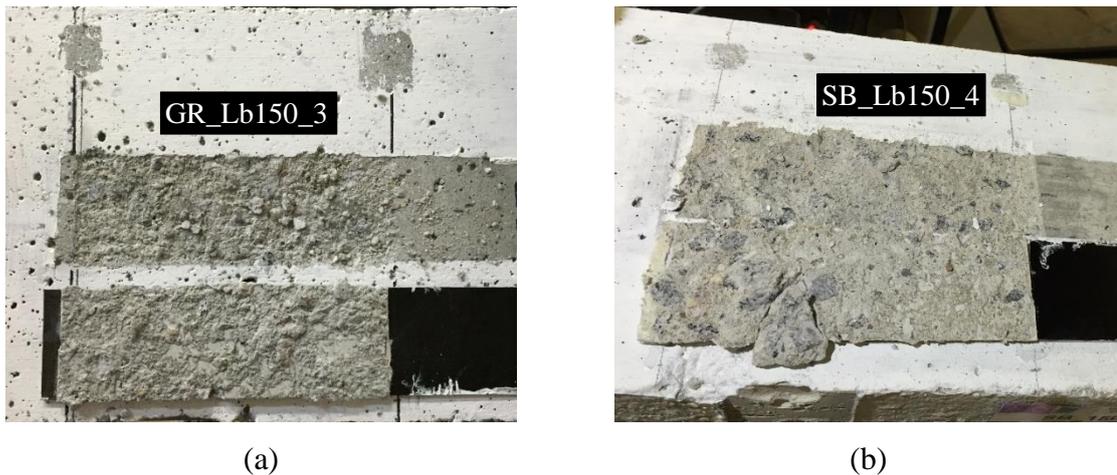


Figura 4.5 - Superfícies de fratura ao nível da interface CFRP/betão após o destacamento do sistema EBR CFRP, quando utilizadas diferentes técnicas de tratamento da superfície antes da aplicação do adesivo: (a) tratamento com esmeril (GR); (b) tratamento com jato de areia (SB).



Figura 4.6 - Superfície de fratura dos laminados de CFRP após os ensaios, quando utilizadas diferentes técnicas de preparação da superfície antes da aplicação do adesivo: (a) tratamento com recurso a esmeril (provete GR_Lb200_3); (b) tratamento com jato de areia (provete SB_Lb200_4).

A análise realizada às superfícies de fratura, após os ensaios de arranque direto, veio confirmar os resultados obtidos e já apresentados neste documento. De facto, quando utilizado jato de areia na preparação da superfície de betão, incrementos significativos de força de arranque máxima ($F_{l,max}$) foram registados, relativamente aos provetes cuja superfície foi tratada com recurso a esmeril. No primeiro caso, devido à maior rugosidade proporcionada pelo tratamento de superfície (ver Tabela 4.1), o adesivo epoxídico conseguiu penetrar melhor a camada de

betão, enquanto que, no segundo caso, devido ao menor nível de rugosidade apresentado, a descontinuidade da interface ficou mais pronunciada.

4.4 Influência das variáveis em estudo

Com base nos resultados obtidos e já apresentados na Tabela 4.2, nesta secção será analisada a influência do tratamento de superfície utilizado (GR e SB) e do comprimento de ancoragem adotado (L_b) nos seguintes aspetos: (i) a resposta em termos de força de arranque (F_l) *versus* deslizamento na extremidade carregada (s_l), (ii) a força de arranque máxima ($F_{l,max}$), (iii) a máxima tensão tangencial média (τ_{max}), (iv) a energia dissipada (G_f) e (v) o parâmetro de eficiência (f_{fd}/f_{fu}).

4.4.1 Força de arranque *versus* deslizamento na extremidade carregada

De forma a analisar a influência do tratamento de superfície utilizado, na Figura 4.7 são apresentadas as curvas médias por série em termos de força de arranque (F_l) *versus* deslizamento na extremidade carregada (s_l), onde são comparadas as respostas dos provetes com o mesmo comprimento de ancoragem (L_b) e diferentes processos de preparação da superfície (GR e SB). Por sua vez, na Figura 4.8 são apresentadas as mesmas curvas, mas de modo a ser perceptível a influência da utilização dos diferentes comprimentos de ancoragem quando o mesmo processo de preparação de superfície foi utilizado. Cada uma das curvas apresentadas, foi obtida a partir da média das quatro curvas correspondentes aos provetes ensaiados nas mesmas condições, já apresentadas na Figura 4.3.

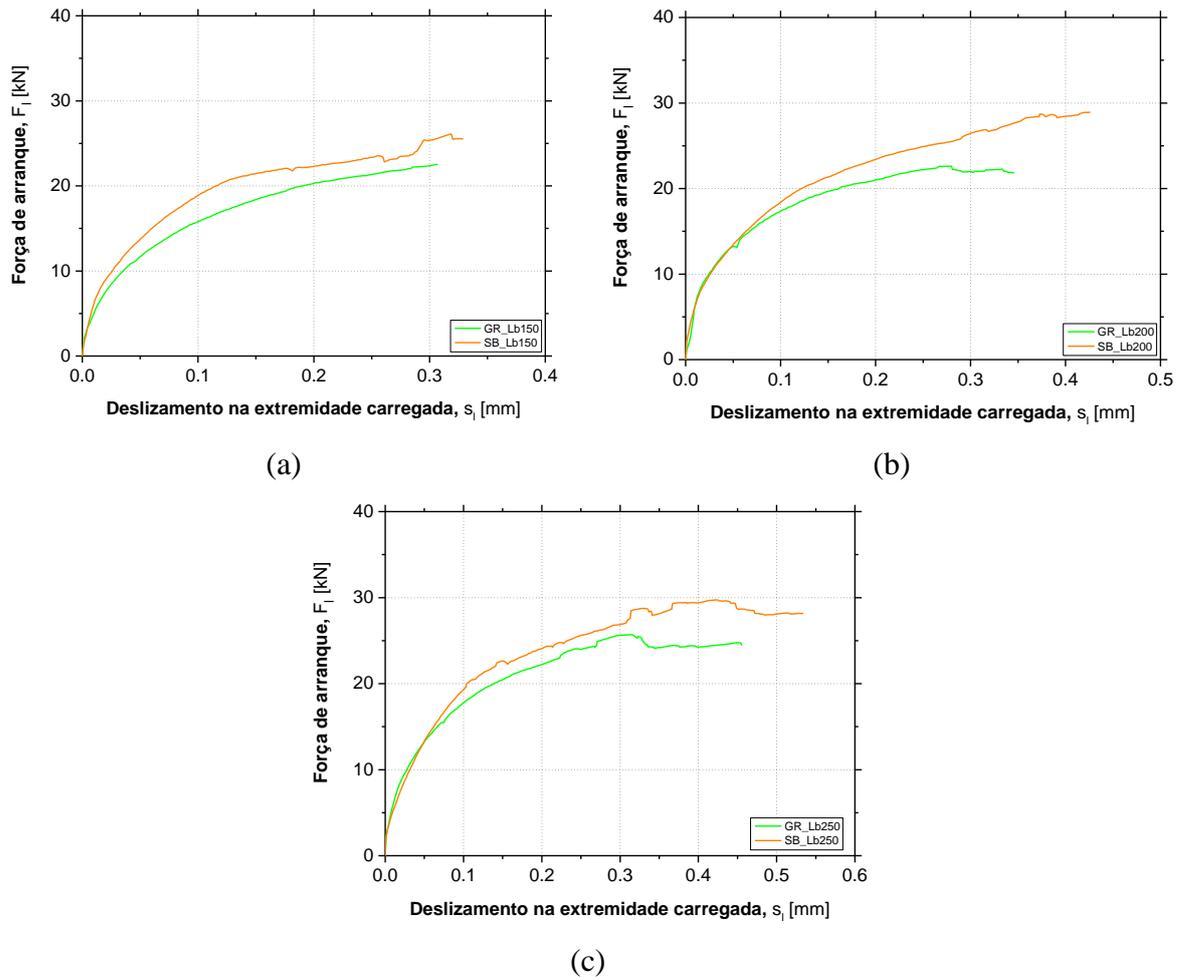


Figura 4.7 - Curvas médias em termos de força de arranque *versus* deslizamento na extremidade carregada quando o mesmo comprimento de ancoragem e diferentes métodos de tratamento da superfície são utilizados: (a) $L_b = 150$ mm; (b) $L_b = 200$ mm; (c) $L_b = 250$ mm.

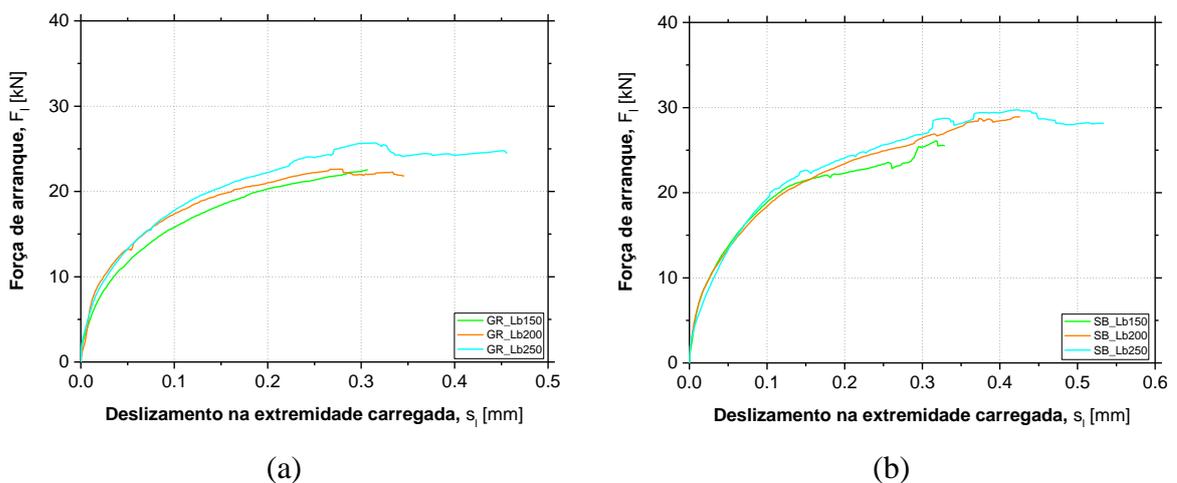


Figura 4.8 - Curvas médias em termos de força de arranque *versus* deslizamento na extremidade carregada quando diferentes comprimentos de ancoragem e o mesmo método de tratamento da superfície são utilizados: (a) tratamento com esmeril (GR); (b) tratamento com jato de areia (SB).

Da análise das respostas apresentadas na Figura 4.7, é conclusivo que o método de preparação da superfície utilizado não alterou de forma significativa a rigidez inicial do sistema pois, comparando o ramo inicial das curvas, estas apresentam um declive praticamente coincidente. Todavia, o tratamento com jato de areia permitiu que o processo de rotura por destacamento do sistema EBR CFRP se tenha iniciado para valores superiores de carga aplicada, relativamente aos provetes onde se utilizou esmeril. Este aspeto é notável nas curvas apresentadas, visto que nos provetes onde se aplicou o jato de areia, a fase de comportamento inicial mantém a sua linearidade até serem atingidos valores superiores de carga de arranque. Assim pode ser concluído que este método de preparação de superfície demonstrou ser mais eficaz em termos de resistência à rotura por destacamento do sistema de reforço, refletindo a importância da utilização de um tratamento de superfície eficaz que proporcione um nível de rugosidade adequado, quando aplicada a técnica EBR.

Analisando a Figura 4.8, ao contrário do que foi observado quando diferentes processos de preparação da superfície foram utilizados, a forma das curvas força de arranque *versus* deslizamento na extremidade carregada, não foi alterada com o aumento do comprimento de ancoragem. Nestas, para além da rigidez inicial do sistema ser praticamente coincidente, o início do processo de destacamento do sistema de reforço ocorre para valores de carga bastante próximos. Este aspeto já seria previsível devido ao facto de para além de ter sido utilizado o mesmo adesivo epoxídico no reforço de todos os provetes, a mesma metodologia de tratamento superficial do betão está a ser comparável, sendo estes os principais fatores que influenciam a resistência ao destacamento do sistema de reforço. Contudo, e como seria expectável, valores superiores de força de arranque máxima ($F_{l,max}$) e de deslizamento na extremidade carregada (s_l) foram obtidos quando maiores valores de L_b foram utilizados, o que sugere que os valores de comprimento de ancoragem adotados, mais concretamente o de 150 e 200 mm, não são superiores ao comprimento ótimo de ancoragem (l_e), daí que quando se passa de um comprimento para o outro, seja possível aumentar o desenvolvimento de ligação eficaz na transferência de tensões entre o laminado de CFRP e o provete de betão. Esta observação torna-se mais clara nos provetes cujas superfícies foram tratadas com jato de areia (ver Figura 4.8 (b)) onde se verifica um aumento mais pronunciado de força máxima de arranque na passagem de

um L_b de 150 mm para 200 mm, o que faz prever um comprimento ótimo de ancoragem entre 200 mm e 250 mm.

4.4.2 Força de arranque máxima

A Figura 4.9 apresenta os resultados em termos de força de arranque máxima registada nos ensaios, onde é possível analisar a influência do método de tratamento de superfície utilizado e do comprimento de ancoragem adotado.

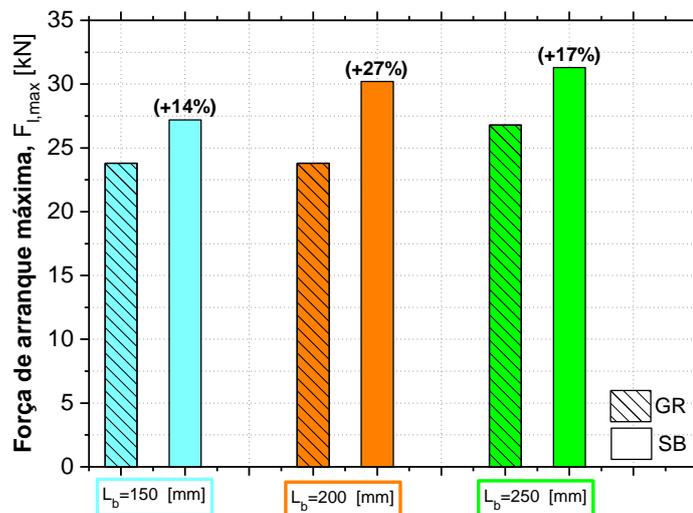


Figura 4.9 - Influência das variáveis em estudo na força de arranque máxima.

Nota: os valores entre parêntesis representam o aumento percentual da força de arranque máxima quando utilizado o tratamento de superfície com jato de areia em relação ao tratamento com esmeril, em provetes de igual comprimento de ancoragem.

Como seria expectável e, depois da análise das curvas F_l versus s_l , a preparação da superfície com jato de areia permitiu obter uma resistência à rotura por destacamento do sistema de reforço consideravelmente superior à obtida quando o tratamento com esmeril foi utilizado. Assim, torna-se evidente a influência do nível de rugosidade apresentado pela superfície de betão na eficácia do reforço com a técnica EBR. De forma mais concreta, quando utilizado jato de areia em vez do esmeril, aumentos da força de arranque máxima em 14%, 27% e 17% foram registados respetivamente nos provetes com comprimento de ancoragem de 150, 200 e 250 mm. Aumentos na mesma ordem de grandeza, já tinham sido obtidos noutros estudos onde as mesmas técnicas de tratamento de superfície foram utilizadas, como no caso do trabalho realizado por Savoia *et al.* (2007). De facto, os provetes com 200 mm de comprimento de

ancoragem, apresentaram um aumento mais acentuado de carga máxima de arranque, relativamente aos restantes provetes. Esta situação pode ser justificada pelo facto de a preparação da superfície com esmeril, para além do facto de ser menos eficaz do que o jato de areia, não ter sido bem executada nos provetes com este comprimento de ancoragem, tal como é observável nos valores de rugosidade média (R_m) reduzidos, apresentados na Tabela 4.1. Mais do que o jato de areia, o tratamento com recurso a esmeril está muito dependente da habilidade e experiência do executante. Contudo, ficou ainda mais pronunciada a importância de a superfície apresentar um nível de rugosidade adequado para ser possível aumentar a resistência à rotura por destacamento do sistema EBR CFRP.

Em relação à influência do comprimento de ancoragem (L_b) adotado no reforço dos provetes, é possível identificar um aumento da carga de arranque máxima quando o valor de L_b aumenta, mas não de forma diretamente proporcional. Este aumento foi mais acentuado quando se alterou o L_b de 150 mm para 200 mm relativamente à passagem do valor de L_b de 200 mm para 250 mm, excetuando os provetes cuja superfície foi tratada com esmeril devido às razões explicadas anteriormente. De forma mais concreta, quando aplicado o tratamento de superfície com jato de areia, aumentos de 11% e de 4% foram registados quando se alteraram os valores de L_b de 150 mm para 200 mm e de 200 mm para 250 mm, respetivamente. Estes resultados parecem querer adivinhar que o comprimento ótimo de ancoragem, a partir do qual o aumento de L_b não se traduz num aumento de $F_{l,max}$, se encontra entre 200 mm e 250 mm, tal como será comprovado de forma analítica posteriormente.

4.4.3 Tensão tangencial média para a força de arranque máxima

A Figura 4.10 apresenta os resultados em termos de tensão tangencial média (τ_{max}) na interface entre o laminado de CFRP e a superfície de betão, no instante em que a força de arranque máxima foi atingida.

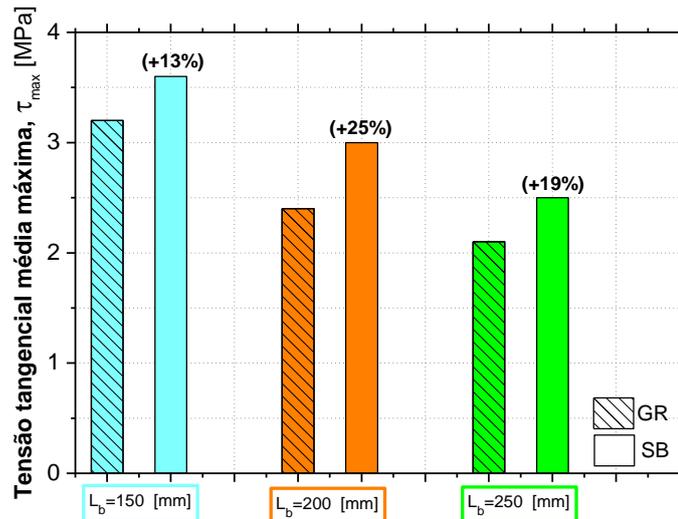


Figura 4.10 - Influência das variáveis em estudo na tensão tangencial média máxima.

Nota: os valores entre parêntesis representam o aumento percentual de tensão tangencial média máxima quando utilizado o tratamento de superfície com jato de areia em relação ao tratamento com esmeril, em provetes de igual comprimento de ancoragem.

Analisando os resultados apresentados, é verificado que o tratamento da superfície com jato de areia permitiu aumentar o valor de tensão média registrada no instante em que a força de arranque máxima foi atingida, relativamente ao tratamento com recurso a esmeril. Mais concretamente, registaram-se aumentos de 13%, 25% e 19%, quando adotados comprimentos de ancoragem de 150, 200 e 250 mm, respetivamente. Estes resultados eram previsíveis, visto que já foi concluído que a utilização de jato de areia se revelou mais eficaz e permitiu aumentar de forma considerável a força de arranque máxima, devido ao maior e mais adequado nível de rugosidade que proporciona às superfícies de betão.

Em termos de influência do comprimento de ancoragem adotado (L_b), a tendência verificada foi a diminuição do valor de τ_{max} com o aumento de L_b . A razão para este comportamento é o facto de maiores comprimentos de ancoragem permitirem que uma maior área de contacto seja mobilizada e que exista uma distribuição menos uniforme das tensões de corte ao longo do comprimento de ligação. Assim, registaram-se diminuições em 25% e 13%, nos provetes cuja superfície foi tratada com esmeril, quando se alteraram os valores de L_b de 150 mm para 200 mm e de 200 mm para 250 mm, respetivamente. Por sua vez, nos provetes onde se aplicou o jato de areia, uma igual diminuição em 17% foi obtida quando se passou de um L_b de 150 mm para 200 mm e de 200 mm para 250 mm.

4.4.4 Energia dissipada

Na Figura 4.11 são apresentados os resultados em termos de energia dissipada (G_f) ao longo do processo de carregamento no ensaio de arranque, até ao instante em que um deslizamento no valor de 0.3 mm foi registado na extremidade carregada. A sua análise permite retirar conclusões sobre a efetividade da metodologia de preparação da superfície aplicada, bem como sobre a influência do comprimento de ancoragem.

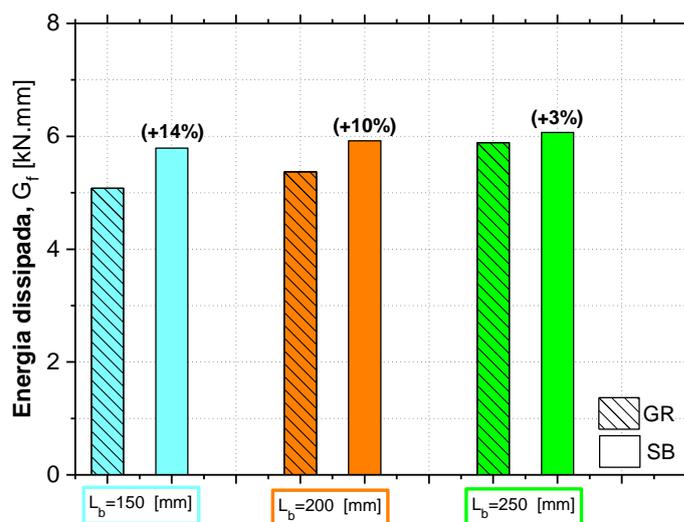


Figura 4.11 - Influência das variáveis em estudo na energia dissipada.

Nota: os valores entre parêntesis representam o aumento percentual da energia dissipada quando utilizado o tratamento de superfície com jato de areia em relação ao tratamento com esmeril, em provetes de igual comprimento de ancoragem.

Como seria previsível, os provetes cuja superfície foi tratada com jato de areia apresentaram uma maior resistência à rotura, tal como tinha sido demonstrado na análise das forças de arranque máximas registadas nos ensaios. Com a análise deste parâmetro, torna-se perceptível que a energia dissipada até ser registado um deslizamento de 0.3 mm na extremidade carregada é 14%, 10% e 3% superior nos provetes onde foi aplicado jato de areia, relativamente aos tratados superficialmente com esmeril, respetivamente para valores de L_b de 150, 200 e 250 mm. Assim, mais uma vez ficou demonstrada a superioridade em termos de eficiência de reforço quando aplicado o jato de areia relativamente à preparação da superfície com esmeril. Esta superioridade também seria expectável depois da análise das superfícies de fratura apresentadas pelo laminado após o destacamento do sistema, visto que aqueles que tinham sido instalados numa superfície tratada com jato de areia apresentavam uma camada mais espessa

de betão, o que demonstra um melhor comportamento de aderência da interface CFRP/betão e justifica os valores mais elevados de G_f obtidos. Contudo, com a análise deste parâmetro, a maior eficiência do tratamento com jato de areia não ficou tão evidenciada como com a análise da força de arranque máxima registada, devido ao facto de o valor de G_f ter sido traduzido pela área sob a curva força de arranque (F_l) *versus* deslizamento na extremidade carregada (s_l) até um deslizamento de 0.3 mm.

Em termos de influência do comprimento de ancoragem (L_b) nos valores de G_f obtidos, os provetes onde foi aplicado esmeril, registaram aumentos de 6% e 10%, quando se passou de um valor de L_b de 150 mm para 200 mm e de 200 mm para 250 mm, respetivamente. Nos provetes onde o jato de areia foi aplicado, foram registados aumentos de 2% e de 3% quando o valor de L_b passou de 150 mm para 200 mm e de 200 mm para 250 mm. De facto, nestes últimos, o comprimento de ancoragem demonstrou ser menos influente, o que pode ser justificado pelo facto da energia dissipada, até ao valor de deslizamento proposto, estar mais dependente da técnica de preparação da superfície e da sua efetividade.

4.4.5 Eficiência do sistema de reforço

A Figura 4.12 apresenta os resultados obtidos em termos de parâmetro de eficiência (f_{fd}/f_{fu}). De modo geral, independentemente da técnica de preparação da superfície utilizada e do comprimento de ancoragem adotado, baixas percentagens de utilização da capacidade resistente do laminado foram registadas devido ao facto de a rotura observada ter sido por destacamento do sistema EBR CFRP, muito antes deste ter atingido a sua resistência à tração.

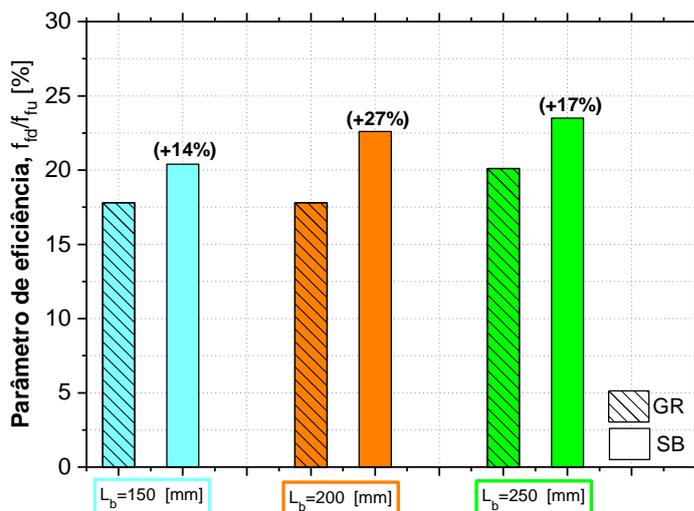


Figura 4.12 - Influência das variáveis em estudo na eficiência do sistema de reforço.

Nota: os valores entre parêntesis representam o aumento percentual do valor do parâmetro de eficiência quando utilizado o tratamento de superfície com jato de areia em relação ao tratamento com esmeril, em provetes de igual comprimento de ancoragem.

Quando a força de arranque máxima ($F_{l,max}$) foi atingida, a tensão média de tração (f_{fd}) no laminado de CFRP dos provetes cuja superfície foi tratada com esmeril, variou entre 397 MPa e 447 MPa, enquanto que nos provetes onde foi aplicado jato de areia a mesma tensão variou entre 453 MPa e 522 MPa. Os valores de tensão referidos ficam muito aquém da tensão última que o mesmo laminado experimentou no ensaio de tração uniaxial (2222 MPa), o que significa que apenas um valor percentual entre 18% e 24% da capacidade resistente do laminado foi eficaz. Assim, é desde logo conclusivo que em elementos de betão armado reforçados de acordo com a técnica EBR, o comportamento da interface entre o laminado e a superfície de betão tem um papel preponderante, o que evidencia a importância de se proceder a um tratamento de superfície que proporcione um nível de rugosidade adequado.

Apesar do reduzido aproveitamento das capacidades resistentes do laminado de CFRP, com a análise dos resultados obtidos é verificada a influência do método de preparação de superfície utilizado e do comprimento de ancoragem adotado. Os provetes de betão cujas superfícies foram tratadas com recurso a jato de areia, apresentaram valores de f_{fd}/f_{fu} superiores relativamente aos provetes onde o tratamento com esmeril foi utilizado. Maiores valores de L_b , também proporcionaram uma maior eficiência do sistema de reforço.

4.5 Relação entre a rugosidade da superfície e a força de arranque máxima

Na Tabela 4.3 são apresentados os valores médios dos resultados obtidos em cada série de ensaio em termos de força de arranque máxima ($F_{l,max}$) e rugosidade média (R_m) da superfície, de forma a ser investigada a sua relação. Tal como foi analisado e discutido anteriormente, a preparação da superfície de betão com jato de areia, permitiu obter um nível de rugosidade superior e conseqüentemente uma maior resistência ao destacamento do sistema EBR CFRP.

Tabela 4.3 - Relação entre força de arranque máxima ($F_{l,max}$) e rugosidade média da superfície (R_m).

Série	$F_{l,max}$ [kN]	R_m [mm]	Série	$F_{l,max}$ [kN]	R_m [mm]
GR_Lb150	23.8	0.137	SB_Lb150	27.2	0.533
GR_Lb200	23.8	0.120	SB_Lb200	30.2	0.460
GR_Lb250	26.8	0.165	SB_Lb250	31.3	0.491

Reconhecida a influência da rugosidade da superfície no desempenho da técnica EBR, a Figura 4.13 evidencia graficamente a relação entre a resistência da ligação ($F_{l,max}$) e a rugosidade média (R_m) da superfície. Nesta, encontra-se apresentada a linha de tendência linear que relaciona os referidos parâmetros, cuja equação segue a seguinte forma genérica: $F_{l,max} = m \times R_m + b$, onde “m” representa a eficiência do aumento da rugosidade e “b” traduz o limite teórico de resistência se um valor nulo de R_m fosse considerado. Para obter a equação anterior, apenas se utilizaram os resultados dos provetes cujo comprimento de ancoragem foi de 200 mm e 250 mm (para ambos os métodos de preparação da superfície utilizados) devido ao facto de estes valores não serem inferiores ao comprimento ótimo de ancoragem (l_e), calculado de acordo com a CNR (2013). Segundo as previsões desta norma, aplicando a equação (4.4) para o caso dos ensaios realizados no presente trabalho, o comprimento ótimo de ancoragem (l_e), a partir do qual o aumento de L_b não se traduz num aumento de resistência da ligação, é de 200 mm. Este valor já tinha sido experimentalmente previsto, quando analisada a influência dos vários comprimentos de ancoragem na força de arranque máxima obtida.

Relativamente ao reconhecimento da importância da utilização de um método de preparação da superfície que proporcione um adequado nível de rugosidade, este já foi estabelecido pela CNR (2013). Contudo, na formulação proposta para previsão da força de arranque máxima (F_{\max}) (equação (4.5)), nenhum dos parâmetros tem em conta o nível de rugosidade apresentado pela superfície. Aplicando a equação para o caso dos ensaios experimentais realizados, o valor de força de arranque prevista pela norma tem o valor de 27.1 kN. Esta previsão está representada a linha vermelha na Figura 4.13.

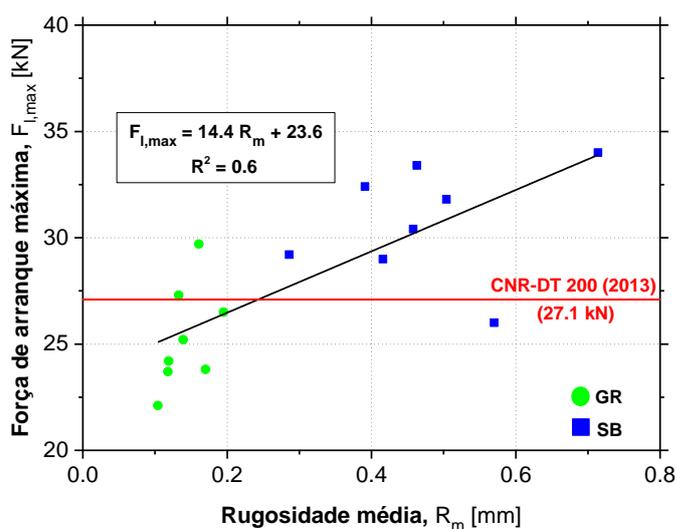


Figura 4.13 - Relação entre os parâmetros $F_{l,max}$ e R_m .

Nas formulações apresentadas para o cálculo de l_e e de F_{\max} , os parâmetros E_f , b_f e t_f representam, respetivamente, o módulo de elasticidade, a largura e a espessura do laminado de CFRP. Por sua vez, γ_{Rd} traduz um fator corretivo igual a 1.25, enquanto que o parâmetro f_b representa a resistência média de ligação e é obtido em função do parâmetro Γ_{Fm} . Este último representa a energia de fratura média da interface e pode ser calculado de acordo com a equação (4.6). Nesta, o parâmetro k_b traduz um fator corretivo geométrico que é função da razão entre a largura do FRP (b_f) e a largura do provete de betão (b), tal como está definido na equação (4.7). Por sua vez, o parâmetro k_G representa um fator corretivo adicional calibrado com base numa alargada quantidade de resultados experimentais e, de acordo com a norma, no caso de sistemas FRP pré-curados tem um valor médio de 0.063 mm. Por fim, os parâmetros f_{cm} e f_{ctm} representam, respetivamente, os valores médios de resistência à compressão e tração do betão. Torna-se importante referir que todos os fatores de segurança foram considerados unitários, de

modo a serem comparáveis os valores das previsões analíticas com os valores experimentais obtidos.

$$l_e = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_b} \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fm}}{2}}, 200 \text{ mm} \right\} \quad (4.4)$$

$$F_{\max} = b_f \cdot \sqrt{2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fm}} \quad (4.5)$$

$$\Gamma_{Fm} = k_b \cdot k_G \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (4.6)$$

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - b_f/b}{1 + b_f/b}} \geq 1 \quad \text{se } b_f/b \geq 0.25 \quad (4.7)$$

Com a análise da Figura 4.13, é conclusivo que a formulação apresentada pela CNR (2013) pode ser considerada como uma boa previsão da resistência da ligação quando o tratamento superficial utilizado possui uma eficiência limitada. Como é possível observar, quando a rugosidade da superfície apresentou valores de R_m mais elevados (caso dos provetes onde foi utilizado jato de areia), a força de arranque máxima prevista pela norma ficou muito aquém da resistência da ligação obtida experimentalmente.

Com o objetivo de incluir, na formulação anterior, um novo parâmetro (k_R) que tenha em conta o nível de rugosidade da superfície e que possibilite uma melhor previsão da resistência da ligação quando métodos de tratamento de superfície mais eficientes são utilizados, o seguinte procedimento de cálculo foi adotado: (1) aplicando a equação (4.5) e considerando o valor de F_{\max} igual ao valor de força de arranque máxima obtida experimentalmente, para cada um dos provetes ensaiados, foram determinados os correspondentes valores experimentais de energia de fratura média (Γ_{Fm}); (2) aplicando a equação (4.6), e tendo em conta os valores de Γ_{Fm} obtidos para cada um dos ensaios de arranque realizados, foi determinado o respetivo valor de k_G . Os valores de k_G obtidos a partir dos resultados dos ensaios experimentais estão representados na Figura 4.14 em função dos respetivos valores de R_m . A equação da reta linear que relaciona os parâmetros k_G e R_m encontra-se representada na mesma figura, assim como o valor médio de k_G sugerido pela CNR (2013) (linha vermelha).

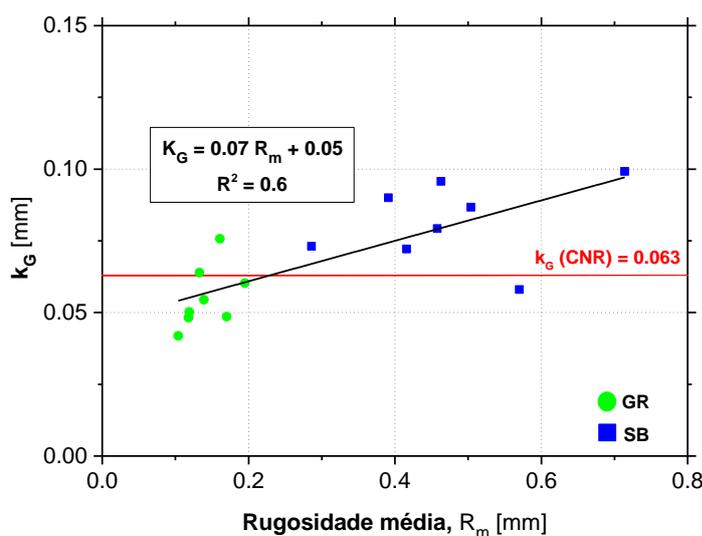


Figura 4.14 - Relação entre os parâmetros k_G e R_m .

À semelhança do que foi concluído sobre a precisão da previsão da força máxima de arranque, com a análise da Figura 4.14, pode ser concluído que o valor médio do parâmetro k_G , sugerido pela CNR (2013), é capaz de traduzir os valores experimentais obtidos de forma precisa, no caso do método de preparação da superfície adotado não proporcionar níveis elevados de rugosidade.

Assim, com o objetivo de melhorar as previsões de resistência da ligação sugeridas pela norma em causa, em vez de se alterar o valor médio proposto do parâmetro k_G , um novo parâmetro (k_R) foi introduzido no cálculo da energia de fratura média da interface, de modo a que a rugosidade apresentada pela superfície de betão se torne uma variável influente. A dedução da fórmula que permite o cálculo do parâmetro k_R em função de R_m é apresentada na equação (4.8). Com a inclusão do novo parâmetro, o cálculo da energia de fratura média da interface (Γ_{Fm}) é estabelecido de acordo com a equação (4.9), onde k_G mantém o valor médio proposto pela CNR (2013).

De modo a analisar a precisão do modelo analítico proposto, a Figura 4.15 compara os valores de força de arranque máxima obtidos analiticamente com os valores obtidos nos ensaios experimentais, para cada um dos provetes. Assim, é verificada a precisão do modelo que teve em conta a influência da rugosidade apresentada pela superfície de betão antes da instalação do

sistema de reforço. Recorrendo à equação (4.10), o erro relativo percentual (ERP) médio obtido entre os valores experimentais e os valores analíticos de força de arranque máxima, foi de aproximadamente 5%.

$$k_R = \frac{0.07R_m + 0.05}{0.063} = 1.1 R_m + 0.8 \quad (4.8)$$

$$\Gamma_{Fm} = k_b \cdot k_G \cdot k_R \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (4.9)$$

$$\% ERP = \frac{|F_{L,max,exp} - F_{L,max,anal}|}{F_{L,max,exp}} \times 100 \quad (4.10)$$

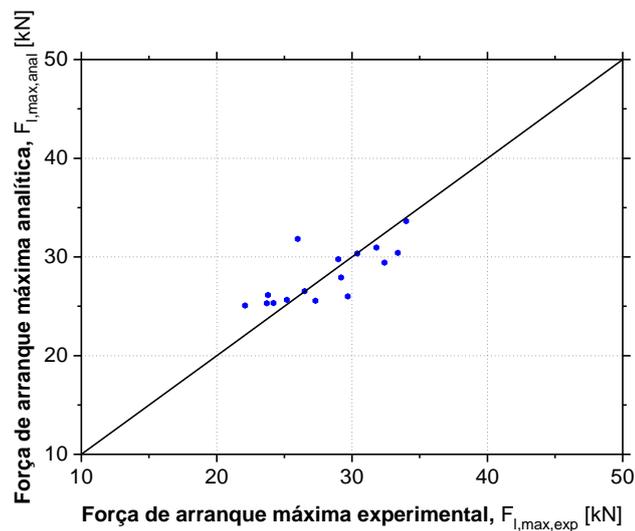


Figura 4.15 - Precisão do modelo analítico proposto (comparação entre a força de arranque máxima analítica ($F_{L,max,anal}$) e a força de arranque máxima obtida nos ensaios experimentais ($F_{L,max,exp}$)).

4.6 Comportamento da interface

Em cada série de quatro provetes ensaiados nas mesmas condições (mesmo método de preparação da superfície e comprimento de ancoragem), um dos provetes foi instrumentado com um conjunto de extensómetros instalados ao longo da superfície longitudinal dos laminados de CFRP. A posição e as distâncias entre extensómetros consecutivos, dependeram do comprimento de ancoragem do respetivo provete e foram apresentadas em detalhe no Capítulo 3, mais concretamente na secção referente à geometria e configuração dos ensaios de arranque direto. A análise da distribuição das extensões na superfície do laminado, ao longo do

comprimento de ancoragem, permite compreender o comportamento da ligação e analisar o processo de destacamento do sistema de reforço durante o ensaio.

A Figura 4.16 apresenta a distribuição das extensões axiais no laminado de CFRP, ao longo do comprimento de ancoragem (L_b), desde a extremidade carregada até à posição do extensómetro mais próximo da extremidade livre, para diferentes níveis de carregamento, relativamente a cada um dos provetes monitorizados.

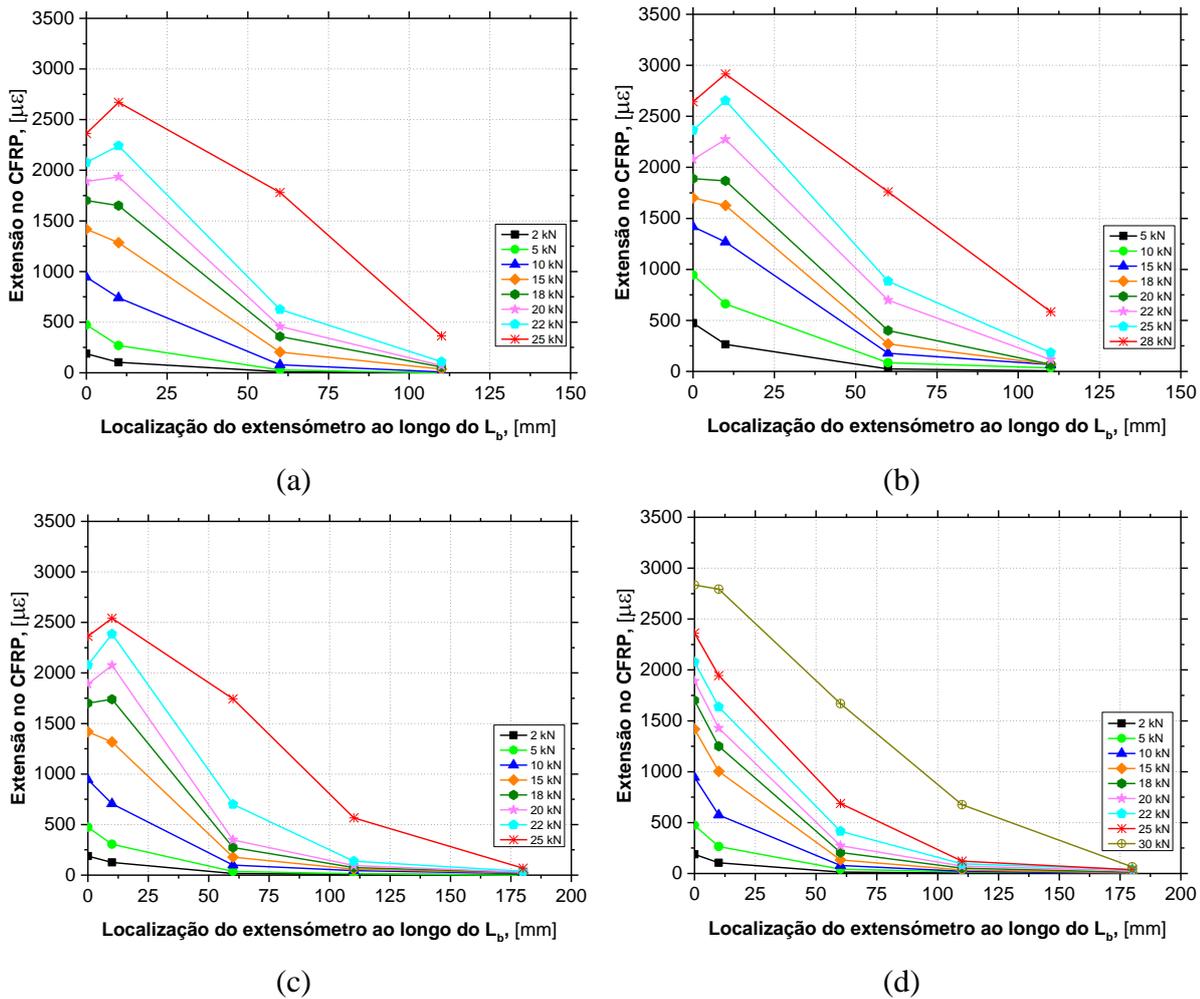


Figura 4.16 - Distribuição das extensões axiais, ao longo do laminado de CFRP, em diferentes níveis de carregamento: (a) GR_Lb150_2; (b) SB_Lb150_3; (c) GR_Lb200_2; (d) SB_Lb200_1; (e) GR_Lb250_1; (f) SB_Lb250_3.

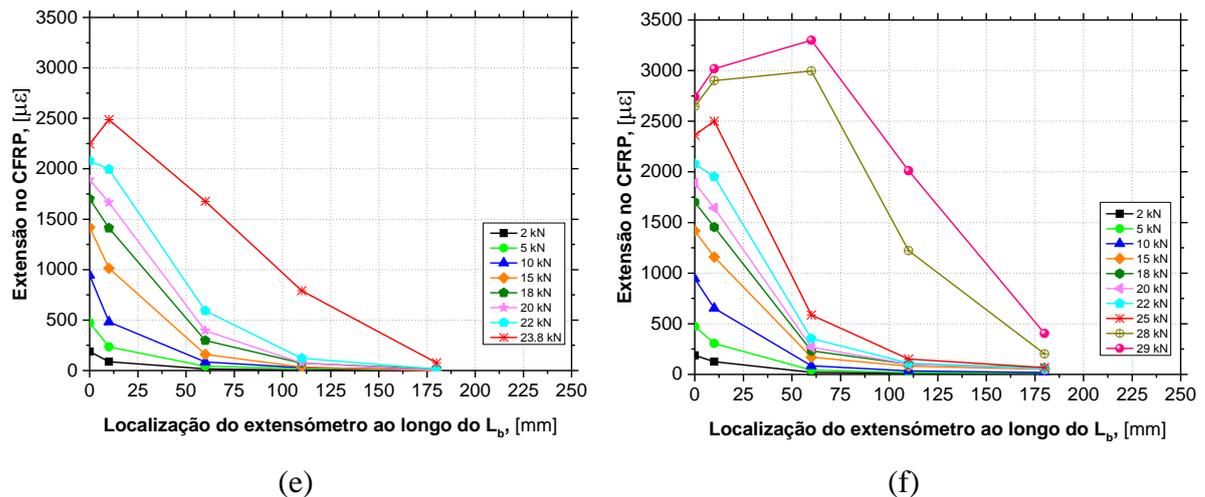


Figura 4.16 (cont.) - Distribuição das extensões axiais, ao longo do laminado de CFRP, em diferentes níveis de carregamento: (a) GR_Lb150_2; (b) SB_Lb150_3; (c) GR_Lb200_2; (d) SB_Lb200_1; (e) GR_Lb250_1; (f) SB_Lb250_3.

O primeiro ponto apresentado em cada um dos perfis de distribuição das extensões ($x = 0$), não foi monitorizado através de um extensômetro, mas sim calculado através da seguinte expressão: $\varepsilon_0 = F_l / (E_f \cdot A_f)$, onde ε_0 traduz o valor de extensão na extremidade carregada, F_l representa a força aplicada nesse instante, E_f o módulo de elasticidade do laminado de CFRP e A_f a respetiva área da secção transversal. O comportamento de interface apresentado por todos os provetes foi bastante semelhante. Antes do processo de destacamento, o perfil de extensões é dado por uma degradação exponencial das extensões desde a extremidade carregada até ao extensômetro instalado numa secção mais próxima da extremidade livre, o qual registou valores de extensão praticamente nulos. Assim que se inicia o processo de destacamento, as extensões registadas pelo extensômetro mais próximo da extremidade carregada, aproximam-se muito das extensões calculadas analiticamente no início do comprimento de ancoragem, o que significa que as tensões de corte não são mais transmitidas ao nível da interface. Nesta fase, a curva de distribuição das extensões passa a ter uma forma em “S”, forma essa que é observada até à rotura. A transição entre as duas diferentes fases referidas, pode ser identificada como o instante em que a resistência da ligação foi atingida. Depois do início do processo de destacamento, com o aumento da carga, os extensómetros colocados ao longo do comprimento de ancoragem vão registando cada vez maiores valores de extensão de forma progressiva ao longo do laminado de CFRP, acompanhando o processo de destacamento. Assim, é notável uma translação da zona capaz de transferir tensões ao longo do comprimento de ancoragem, com o aumento do nível de carregamento, durante o processo de destacamento.

Um aspeto importante a observar é o facto de nos provetes com comprimento de ancoragem de 150 mm (ver Figura 4.16 (a) e (b)), no último nível de carregamento apresentado (próximo de $F_{l,max}$), o extensómetro mais próximo da extremidade livre ainda apresentar extensões significativas. Esta situação é devida ao facto de este ter sido instalado a uma distância de 110 mm da extremidade carregada, estando este desenvolvimento ainda longe do comprimento ótimo de ancoragem (l_e), que de acordo com a CNR (2013), tem um valor igual a 200 mm. Nos restantes provetes, o último extensómetro foi instalado a 180 mm de distância relativamente à extremidade carregada, daí as extensões registadas terem valores muito reduzidos. Contudo esta distância ainda é inferior ao valor de l_e , o que justifica o facto de no provete SB_Lb250_3, quando foi atingida uma carga muito próxima de $F_{l,max}$, o extensómetro mais afastado da extremidade carregada ainda apresentar valores de extensões próximos dos $500 \mu\epsilon$.

Outro aspeto que se torna importante realçar é o facto da extensão registada no primeiro extensómetro, depois de o processo de destacamento se iniciar, registar extensões superiores às calculadas analiticamente na secção da extremidade carregada. Esta situação pode ser explicada pelo facto da distribuição das extensões axiais, na largura do laminado, não ser uniforme. Este aspeto já foi comprovado em estudos científicos, como o caso do trabalho desenvolvido por Subramaniam *et al.* (2007). Estes autores analisaram a distribuição das extensões axiais e distorcionais ao longo da largura do laminado de CFRP após o início do processo de destacamento e verificaram que existe uma zona central onde as extensões distorcionais são praticamente nulas enquanto que, na mesma zona, as extensões axiais apresentam valores aproximadamente constantes e elevados. Com a aproximação aos bordos do laminado de CFRP, valores crescentes de extensões distorcionais foram registados enquanto que uma diminuição progressiva das extensões axiais foi verificada. Assim, os autores concluíram que existe uma zona central da largura do laminado onde as extensões axiais são significativamente mais altas relativamente às regiões de bordo, o que significa que no processo de destacamento, essa região é a primeira responsável pela transferência de tensões.

Na Figura 4.17 é apresentada, de forma esquemática, uma possível distribuição das extensões axiais ao longo do desenvolvimento da largura do laminado utilizado no presente trabalho, depois do início do processo de destacamento. Tal como é possível observar na curva

denominada “real” e, de acordo com o concluído por Subramaniam *et al.* (2007), existe uma zona central onde as extensões axiais são constantes e vão progressivamente reduzindo-se em direção aos seus bordos. Como os extensómetros estão instalados na zona central, são as extensões mais altas as registadas por estes, visto ser a primeira zona responsável pela transferência de tensões. Quando se utiliza a expressão analítica no cálculo da extensão na extremidade carregada, está a ser calculada uma extensão média, tal como representado na curva verde denominada “analítica”. Assim, pode ser justificado o facto de as leituras dos extensómetros, após se ter iniciado o processo de destacamento, apresentarem valores superiores aos calculados analiticamente.

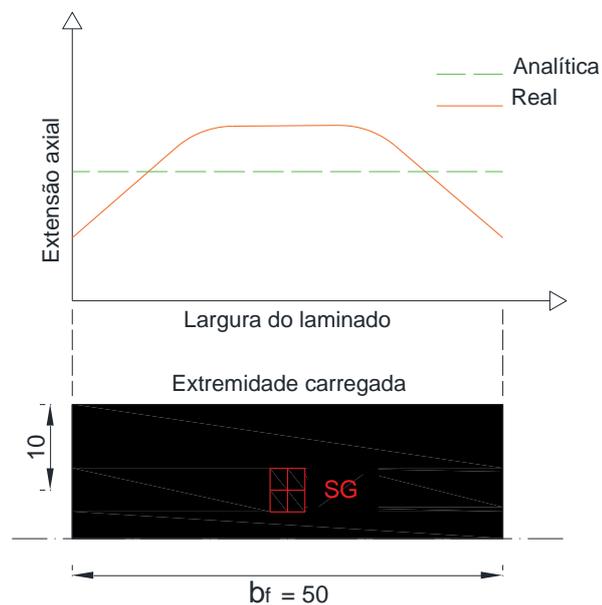


Figura 4.17 - Representação esquemática da distribuição das extensões axiais ao longo da largura do laminado de CFRP, após o início do processo de destacamento do sistema de reforço.

A Figura 4.18 apresenta a distribuição das extensões nos provetes onde foram aplicadas as diferentes metodologias de tratamento da superfície de betão, para apenas dois níveis de carregamento.

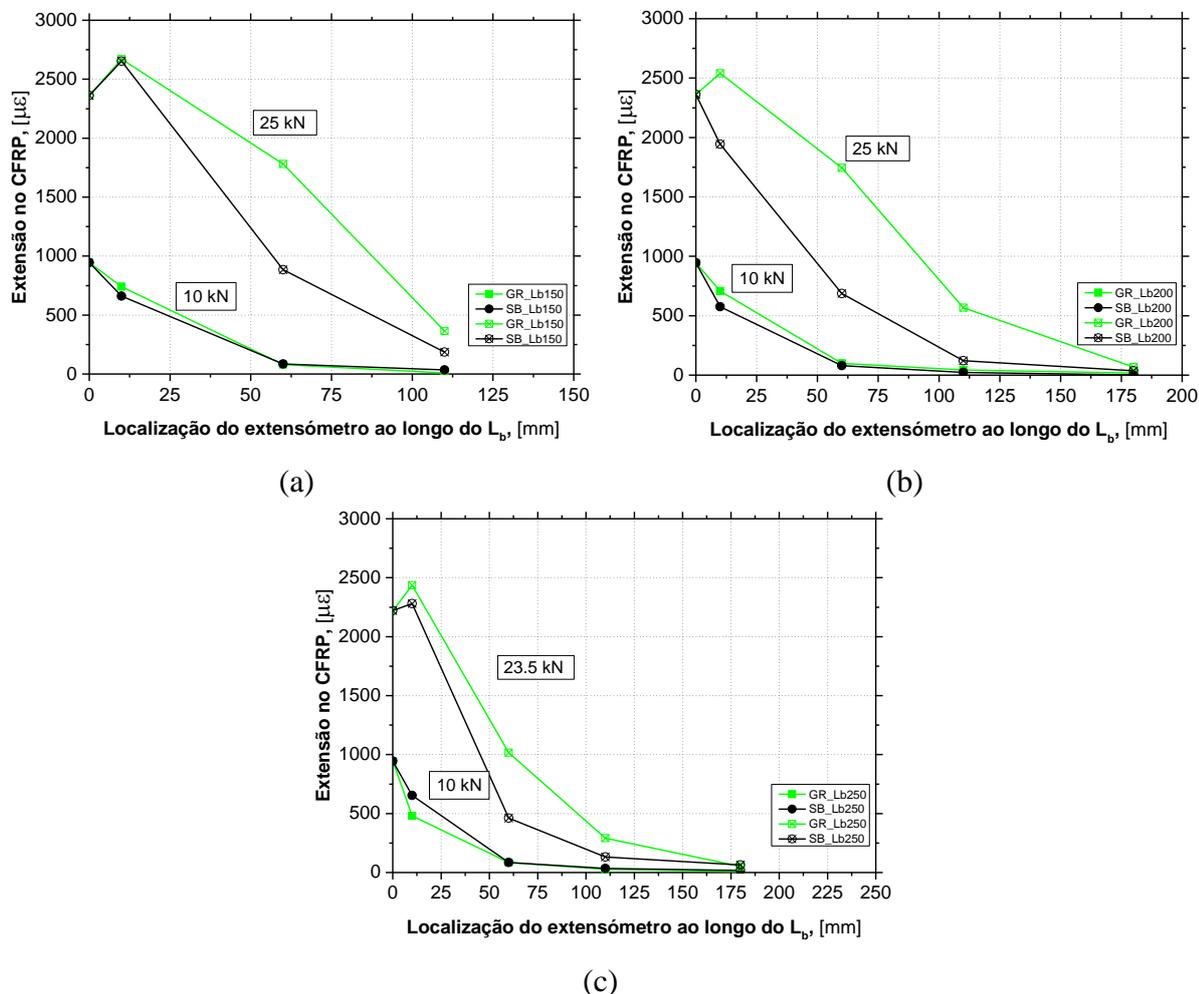


Figura 4.18 - Distribuição das extensões axiais nos provetes com diferentes tratamentos de superfície: (a) GR_Lb150 versus SB_Lb150; (b) GR_Lb200 versus SB_Lb200; (c) GR_Lb250 versus SB_Lb250.

Para o nível de carga mais baixo (10 kN), todas as distribuições de extensões foram muito semelhantes. No entanto, nos provetes onde se aplicou jato de areia, quedas mais abruptas das extensões foram observadas, o que pode indicar uma maior rigidez inicial. Contudo, este comportamento não foi observado nos provetes com comprimento de ancoragem de 250 mm (ver Figura 4.18 (c)) provavelmente devido a alguma situação pontual de irregularidade no provete SB_Lb250_3, que tenha afetado a sua rigidez inicial. No que diz respeito ao nível de carga mais elevado, relativo ao processo de destacamento e no qual são registadas extensões

elevadas, a influência do tratamento de superfície é mais notória. Para o mesmo nível de carga, as extensões registadas no laminado quando o tratamento de superfície foi jato de areia, foram significativamente inferiores relativamente às registadas quando se utilizou o tratamento com esmeril, o que significa uma maior capacidade da ligação em transferir as tensões entre o laminado e a superfície de betão, apesar de que a utilização do esmeril parece ter permitido aumentar o comprimento de ligação onde ocorre a transferência de tensões. Este último aspeto explica o facto de nos provetes onde se utilizou o jato de areia, após a rotura por destacamento do sistema de reforço, se ter observado que um maior comprimento de laminado próximo da extremidade livre não apresentava uma camada de betão ligada à sua superfície, o que significa que aquele desenvolvimento da ligação não contribuiu de forma eficaz para a transferência de tensões. O facto de a preparação da superfície com esmeril não ser tão eficaz, explica a necessidade de um maior comprimento de ligação ser mobilizado na transferência de uma igual tensão axial.

4.7 Conclusões

Um programa experimental de ensaios de arranque direto foi realizado de modo a ser caracterizada a aderência da ligação entre o laminado de CFRP e a superfície de betão, quando utilizada a técnica EBR. O objetivo foi investigar o efeito da rugosidade da superfície de betão na resistência da ligação e, para isso, diferentes metodologias de tratamento foram utilizadas: (i) esmeril, onde se recorreu a uma mó de pedra até se tornarem visíveis os agregados (GR – *Grinding*) e (ii) jato de areia (SB – *Sand Blasting*). De modo a avaliar a eficiência das duas metodologias de tratamento, foi medido o nível de rugosidade de todas as superfícies previamente à instalação do sistema EBR CFRP através de um sensor laser. Complementarmente, foram adotados três diferentes comprimentos de ancoragem (L_b): 150, 200 e 250 mm. Dos resultados obtidos dos ensaios de arranque direto realizados, as seguintes conclusões podem ser retiradas:

- A preparação da superfície com jato de areia proporcionou à superfície de betão um nível de rugosidade superior relativamente ao tratamento que recorreu a esmeril. Esta superioridade foi detetada não só com a inspeção visual da superfície, mas também através das medições realizadas com o sensor laser. Aplicando alguns parâmetros estatísticos na caracterização quantitativa da rugosidade (rugosidade média (R_m) e o

valor quadrático médio (R_q)), uma maior eficiência do tratamento com jato de areia foi verificada;

- Das diferentes metodologias de preparação da superfície, devido aos diferentes níveis de rugosidade que proporcionam, resultaram diferentes valores de resistência da ligação;
- A análise da resposta em termos de F_l versus s_l permitiu verificar que o método de preparação da superfície não alterou significativamente a rigidez inicial do sistema. Contudo, com jato de areia, o processo de destacamento do sistema de reforço ocorreu para valores superiores de carga aplicada. Por sua vez, o aumento do comprimento de ancoragem (L_b), para além de não ter alterado a rigidez inicial do sistema, não alterou significativamente o valor da carga correspondente ao início do processo de destacamento;
- Independentemente da técnica de preparação da superfície utilizada, o modo de rotura observado em todos os provetes de ensaio foi o destacamento do sistema EBR CFRP com remoção de uma fina camada de betão que, após a rotura, surgiu colada ao adesivo e ao laminado. Quando utilizado jato de areia, essa camada de betão era consideravelmente mais espessa do que a observada quando o tratamento com esmeril foi aplicado, o que reflete o melhor comportamento de aderência da ligação;
- A utilização de jato de areia, em detrimento do esmeril, na preparação da superfície de betão proporcionou: aumento da força de arranque máxima ($F_{l,max}$), aumento da tensão tangencial média (τ_{max}) no instante em que $F_{l,max}$ foi atingido, aumento da energia dissipada (G_f) e aumento da eficiência do sistema de reforço, permitindo um melhor aproveitamento da capacidade resistente do laminado de CFRP;
- O aumento do comprimento de ancoragem (L_b) proporcionou: aumento da força máxima de arranque ($F_{l,max}$), diminuição da tensão tangencial média (τ_{max}) no instante em que $F_{l,max}$ foi atingido, aumento da energia dissipada (G_f) e aumento da eficiência do sistema de reforço. A melhoria no comportamento da ligação foi mais pronunciada quando se passou de um L_b de 150 mm para 200 mm, relativamente à passagem de um L_b de 200 mm para 250 mm, devido ao facto de o último já ser superior ao comprimento ótimo de ancoragem (l_e);
- A correlação entre a rugosidade média (R_m) da superfície e a resistência da ligação obtida experimentalmente foi bem-sucedida, fornecendo informações quantitativas

sobre a eficácia dos diferentes métodos de preparação da superfície. Complementarmente, o efeito da rugosidade da superfície foi incluído nas formulações de previsão da resistência da ligação propostas pela CNR (2013), através do parâmetro k_R que depende diretamente do valor de R_m .

CAPÍTULO 5

ENSAIOS DE FLEXÃO EM FAIXAS DE LAJE: RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios de flexão em faixas de laje desenvolvidos na investigação experimental realizada, tiveram como principal objetivo analisar o comportamento estrutural destas faixas de laje quando aplicadas as técnicas EBR e NSM. Com a sua realização viria a ser clarificada a influência de vários parâmetros na resposta das faixas de laje reforçadas, contribuindo, deste modo, para a tomada de decisões mais assertiva no projeto de investigação onde se encontra inserido o presente trabalho. De uma forma geral, o programa de ensaios realizado pode ser interpretado como um estudo preliminar necessário para o sucesso do projeto de investigação *FRPLongDur*.

O programa de ensaios, já apresentado em detalhe no Capítulo 3, foi constituído por um conjunto de sete faixas de laje de betão armado das quais (i) duas foram reforçadas com o sistema EBR CFRP, (ii) quatro foram reforçadas com o sistema NSM CFRP e ainda (iii) uma faixa de laje de referência onde não foi aplicado qualquer tipo de reforço.

Nas lajes reforçadas de acordo com a técnica EBR, a influência de parâmetros como a largura do laminado de CFRP utilizado no seu reforço foi analisada, visto que foram utilizados laminados de secção transversal distinta em cada uma das lajes: (i) laminado de $80 \times 1.2 \text{ mm}^2$ na laje EBR_L80 e (ii) laminado de $100 \times 1.2 \text{ mm}^2$ na laje EBR_L100. Por sua vez, nas lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP, duas principais soluções de reforço foram utilizadas: (i) as lajes NSM_L20_P1 e NSM_L20_P2 foram reforçadas recorrendo a dois laminados com secção transversal de $20 \times 1.4 \text{ mm}^2$ e (ii) as lajes NSM_L10_G1 e NSM_L10_G2 foram reforçadas com quatro laminados de secção transversal $10 \times 1.4 \text{ mm}^2$. Nestas, para além da análise da influência das referidas soluções de reforço distinguidas pela diferente distribuição de material compósito ao longo da secção transversal (ambas com a mesma área total de material de reforço), a influência de parâmetros como a disposição dos laminados de CFRP ao longo da secção transversal da faixa de laje e a profundidade a que estes foram instalados no interior das ranhuras pré-executadas no betão de recobrimento, foi também investigada. Um

aspecto importante referir, é o facto de qualquer uma das soluções de reforço ter sido adotada de modo a duplicar a capacidade de carga da faixa de laje de referência.

Os ensaios monotónicos que levaram as faixas de laje à rotura foram realizados em controlo de deslocamento e a sua configuração também se encontra detalhadamente descrita no Capítulo 3.

No presente capítulo, os resultados obtidos nos ensaios às faixas de laje serão apresentados e discutidos em complementaridade com a análise da influência dos vários parâmetros estudados.

5.1 Síntese dos resultados obtidos

A Tabela 5.1 apresenta uma síntese dos principais resultados obtidos nos ensaios à flexão das faixas de laje. Os parâmetros K_I , K_{II} e K_{III} representam, respetivamente, a rigidez à flexão nas três fases que constituem a resposta típica deste tipo de elementos estruturais de betão armado reforçados com laminados de CFRP: (i) fase elástica, (ii) fase fendilhada e (iii) fase pós-cedência da armadura longitudinal. Por sua vez, os parâmetros F_{cr} , F_y e F_{max} , representam, respetivamente, a força no início da fendilhação, na plastificação das armaduras e a carga máxima registada, sendo δ_{cr} , δ_y e δ_{max} os respetivos deslocamentos verticais medidos a meio vão da faixa de laje. Os incrementos percentuais de carga, quando comparada cada uma das faixas de laje reforçadas com a faixa de laje de referência, são também apresentados. O parâmetro $\varepsilon_{f_{max}}$ representa a máxima extensão registada no laminado de CFRP quando atingida força máxima, F_{max} , enquanto que o parâmetro δ_{max}/δ_y traduz a ductilidade da resposta de cada uma das faixas de laje reforçadas, expresso através da razão entre os deslocamentos registados a meio vão relativos às forças F_{max} e F_y . A última coluna da tabela indica o modo de rotura ocorrido em cada uma das faixas de laje.

Tabela 5.1 - Resultados obtidos nos ensaios à flexão das faixas lajes.

Faixa de laje	Rigidez à flexão			Início da fendilhação		Plastificação das armaduras		Carga máxima		Parâmetro de ductilidade		MR
	K_I	K_{II}	K_{III}	δ_{cr}	F_{cr}	δ_y	F_y	δ_{max}	F_{max}	ε_{fmax}	δ_{max}/δ_y	--
	[kN/mm]			[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[10 ⁻³]	[-]	--
REF	6.71	1.13	-	0.88	8.06	19.19	25.92	117.28 ⁽¹⁾	29.28 ⁽¹⁾	-	-	-
EBR_L80	8.89	1.71	-	0.98	9.62 (19%)	21.94	44.46 (72%)	33.42	54.44 (86%)	5.98	1.52	D
EBR_L100	10.54	1.85	-	1.74	12.45 (55%)	23.04	50.81 (96%)	34.52	61.10 (109%)	5.96	1.50	D
NSM_L20_P1	8.36	1.37	0.42	2.97	13.09 (62%)	22.09	36.68 (42%)	71.81	58.17 (99%)	13.54	3.25	F
NSM_L20_P2	8.42	1.44	0.47	1.77	10.63 (32%)	22.91	39.87 (54%)	74.04	62.31 (113%)	14.52	3.23	F
NSM_L10_G1	9.10	1.28	0.38	1.35	11.61 (44%)	23.16	38.86 (50%)	84.72	62.25 (113%)	16.79	3.66	F
NSM_L10_G2	9.62	1.35	0.40	1.08	9.82 (22%)	23.18	39.14 (51%)	82.40	63.00 (115%)	15.70	3.55	F

Notas: F – Rotura por tração do laminado de CFRP; D – Rotura por destacamento do sistema de reforço; os valores entre parêntesis representam o incremento percentual em termos de força relativamente à faixa de laje de referência (REF).

⁽¹⁾ Valor máximo registado durante o ensaio sem ter ocorrido rotura da laje devido a esmagamento do betão por compressão ou rotura das armaduras de reforço longitudinal de tração.

5.2 Curvas força *versus* deslocamento vertical

Na Figura 5.1, encontram-se representadas as curvas relativas à resposta força *versus* deslocamento a meio vão obtidas nos ensaios à flexão das faixas de laje. Estas apresentam o comportamento típico de elementos de betão armado reforçados à flexão com laminados de CFRP. Desde logo, tal como seria expectável, é notável o melhor comportamento das faixas de laje reforçadas relativamente à faixa de laje de referência tanto em serviço como na rotura, independentemente da técnica de reforço utilizada ter sido a EBR ou a NSM.

Complementarmente, na Figura 5.2, é apresentada a evolução dos deslocamentos verticais experimentados por cada uma das faixas de laje (deformada) ao longo do ensaio, para vários níveis de carregamento que compreendem todas as fases da sua resposta estrutural (desde o início do ensaio até à carga máxima registada). Os deslocamentos verticais foram monitorizados

através de cinco transdutores de deslocamento (LVDT1 a LVDT5) instalados ao longo do eixo longitudinal de cada uma das faixas de laje, tal como foi descrito em detalhe no Capítulo 3 (ver Figura 3.11 (a) e (c)). Com a análise da Figura 5.2, é perceptível o melhor comportamento apresentado pelas lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP relativamente às lajes reforçadas de acordo com a técnica EBR. No instante em que ocorre a rotura do sistema de reforço, isto é, quanto atingida a carga máxima, o deslocamento vertical registado a meio vão das faixas de laje reforçadas com o sistema NSM CFRP foi em média 130% superior ao registado nas faixas de laje onde o sistema EBR CFRP foi aplicado, o que revela o seu comportamento mais dúctil e a maior eficiência do reforço.

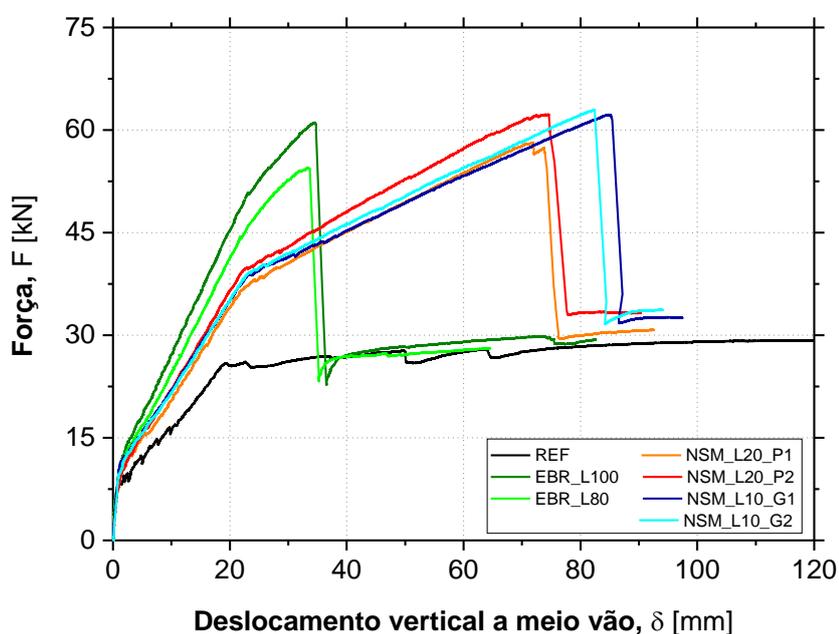


Figura 5.1 - Curvas força *versus* deslocamento vertical a meio vão das faixas de laje.

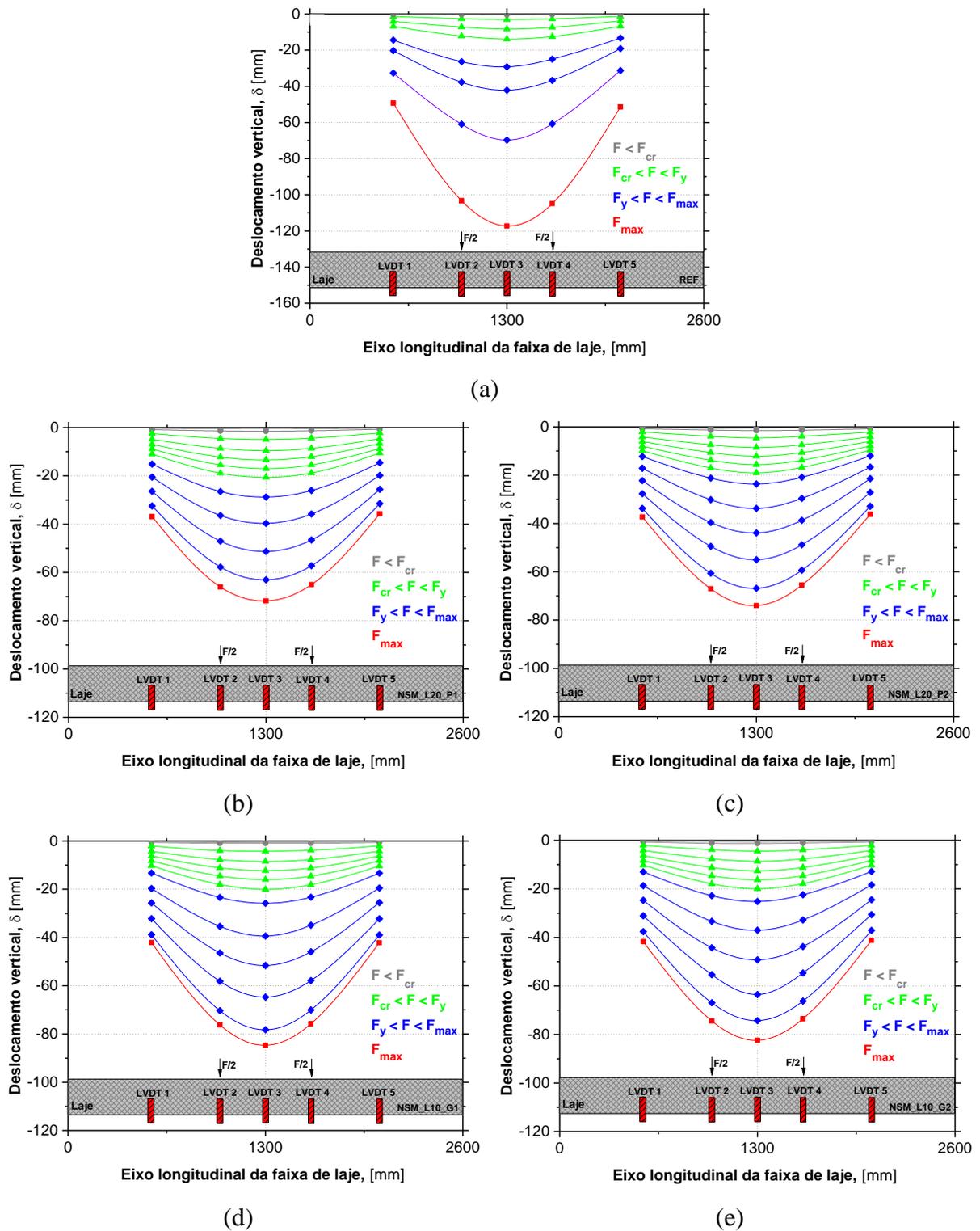


Figura 5.2 - Deslocamentos verticais experimentados pelas faixas de laje (deformada), para vários níveis de carregamento, até à carga máxima registada (F_{max}): (a) REF; (b) NSM_L20_P1; (c) NSM_L20_P2; (d) NSM_L10_G1; (e) NSM_L10_G2; (f) EBR_L80; (g) EBR_L100.

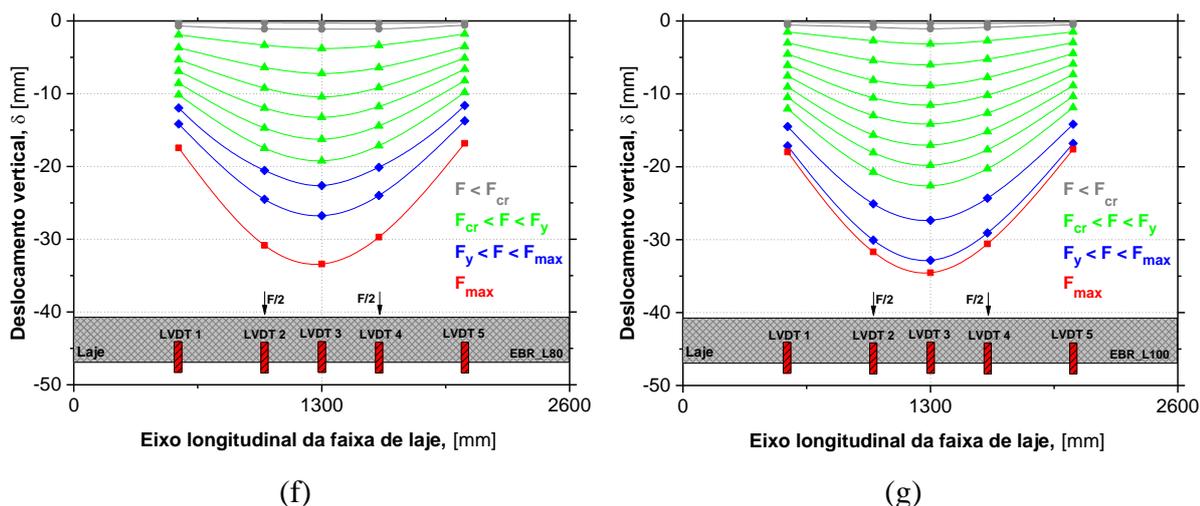


Figura 5.2 (cont.) - Deslocamentos verticais experimentados pelas faixas de laje (deformada), para vários níveis de carregamento, até à carga máxima registada (F_{max}): (a) REF; (b) NSM_L20_P1; (c) NSM_L20_P2; (d) NSM_L10_G1; (e) NSM_L10_G2; (f) EBR_L80; (g) EBR_L100.

Analisando as respostas das faixas de laje reforçadas com laminados de CFRP apresentadas (ver Figura 5.1), todas estas apresentam as três fases de comportamento já mencionadas anteriormente: (i) fase I, correspondente à fase de comportamento elástico, desde o início do ensaio até ao instante de abertura das primeiras fendas nas secções onde o betão atinge a respetiva resistência à tração. Nesta fase, todos os materiais que constituem o elemento estrutural (betão, aço e CFRP) contribuem para a rigidez elástica de flexão (K_I); (ii) fase II, correspondente à fase fendilhada, desde o instante em que se inicia a fendilhação até à cedência das armaduras longitudinais de tração. Nesta fase existe uma contínua formação de fendas no betão tracionado até à sua estabilização. Por conseguinte, o betão em tração vai deixando de contribuir para a rigidez do sistema (K_{II}) enquanto que a profundidade do eixo neutro vai aumentando; (iii) fase III, correspondente à fase de pós-cedência da armadura longitudinal até ser registada a carga máxima. Nesta fase a armadura longitudinal de tração deixa de contribuir para a rigidez K_{III} e a capacidade de carga crescente é essencialmente assegurada pelo laminado em tração e pelo betão em compressão.

A transição entre fases de comportamento existe devido à diminuição da rigidez global de flexão gerada pela perda de eficiência dos materiais envolvidos, mais concretamente o betão tracionado (abertura de fendas) e a plastificação das armaduras longitudinais, respetivamente na transição entre a fase I e II e entre a fase II e III. A fase III termina com a rotura do sistema

de reforço, tendo esta ocorrido quando a totalidade da capacidade resistente do laminado foi esgotada nas lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP, e quando a resistência ao destacamento da interface betão/CFRP foi atingida nas lajes reforçadas com a técnica EBR. Posteriormente, neste documento, os modos de rotura ocorridos serão analisados em detalhe. A partir do instante em que ocorre a rotura do sistema de reforço, as lajes reforçadas passam a ter um comportamento muito próximo do observado na laje de referência, tal como o esperado.

Na faixa de laje NSM_L20_P1, a rotura dos dois laminados de CFRP não ocorreu simultaneamente. Tal facto explica que na curva apresentada na Figura 5.1, exista um nível de carga intermédio entre a força máxima e a força residual.

Relativamente à laje de referência, devido à inexistência de laminado de CFRP, apenas apresenta as duas primeiras fases de comportamento. Nesta, após a plastificação das armaduras longitudinais de tração e devido ao seu comportamento dúctil, apenas se verifica um aumento de deformação a meio vão para uma carga aproximadamente constante (o valor de F_{\max} registado é apenas 13% superior a F_y , devido ao fenómeno de endurecimento do aço).

Um aspeto importante mencionar prende-se ao facto das lajes reforçadas com o sistema EBR CFRP apresentarem a fase III muito menos extensa e definida relativamente às lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP. Esta situação está relacionada com a menor eficiência da primeira técnica (EBR) relativamente à segunda (NSM) para as cargas de rotura, onde é observado o destacamento do laminado numa fase muito precoce ao esgotamento da sua capacidade resistente. Este facto será posteriormente analisado em detalhe. Devido a este comportamento, na Tabela 5.1 não constam valores de rigidez K_{III} relativos às faixas de laje reforçadas com a técnica EBR.

A Figura 5.3 apresenta os resultados obtidos em termos de rigidez à flexão nas três fases da resposta força *versus* deslocamento vertical a meio vão (ver Figura 5.1), para cada uma das faixas de laje. O valor do incremento percentual de rigidez das lajes reforçadas relativamente à laje de referência, é também apresentado.

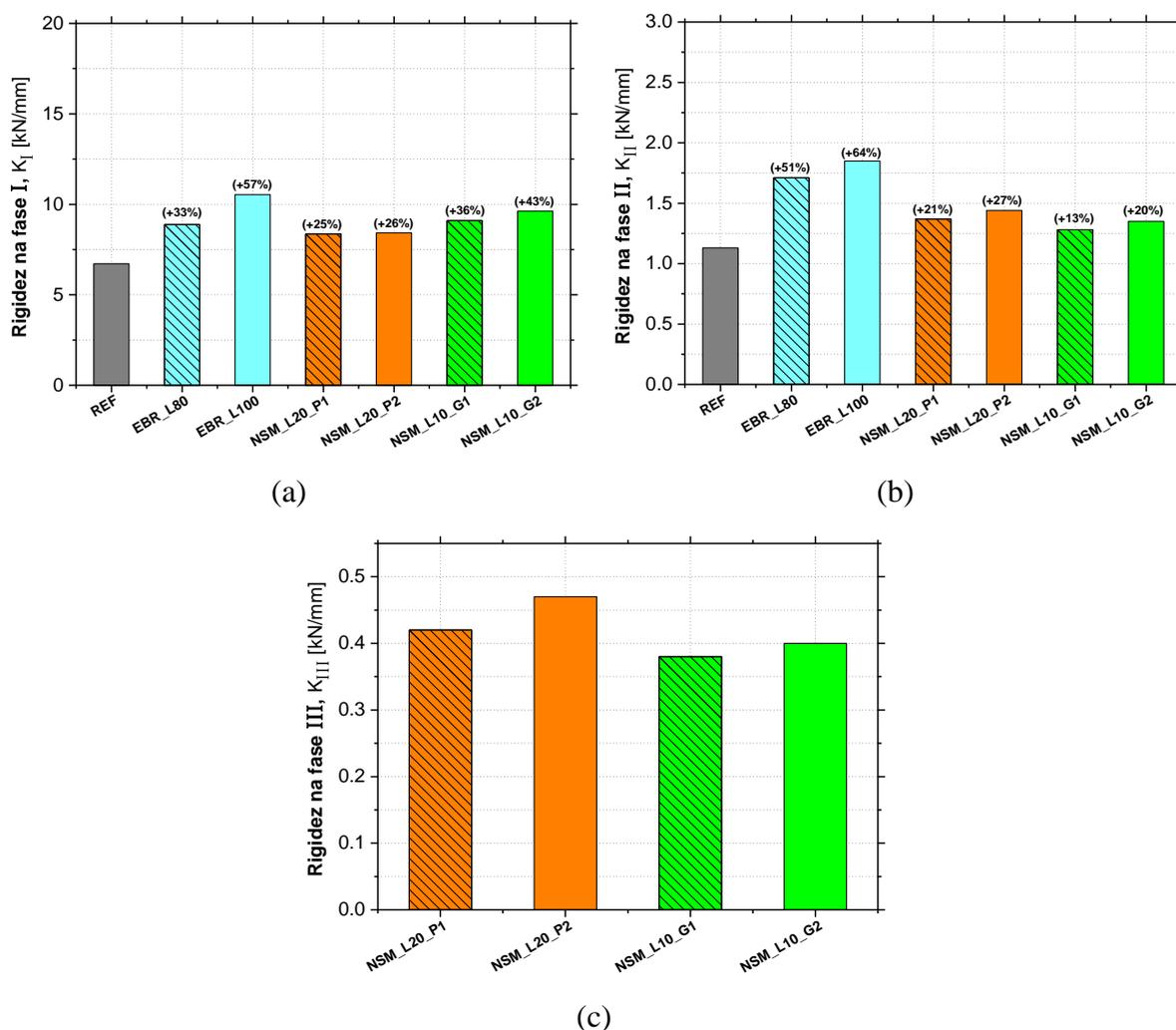


Figura 5.3 - Rigidez à flexão apresentada pelas faixas de laje: (a) fase I; (b) fase II; (c) fase III.

Nota: os valores entre parêntesis representam o aumento percentual de rigidez das faixas de laje reforçadas relativamente à laje de referência.

Analisando a resposta das faixas de laje na fase elástica (fase I), todas as que foram reforçadas apresentaram uma rigidez superior à apresentada pela laje de referência (ver Figura 5.3 (a)). De facto, a laje EBR_L100 foi a que maior superioridade apresentou em termos de rigidez de flexão elástica devido à maior taxa de reforço longitudinal equivalente que apresentava (ver Tabela 3.4 apresentada no Capítulo 3) e devido ao facto do laminado ter sido instalado à superfície. Comparando a rigidez elástica apresentada pelas lajes reforçadas com a técnica NSM, quando utilizados quatro laminados de CFRP (lajes NSM_L10_G1 e NSM_L10_G2), uma maior rigidez foi obtida, possivelmente devido à melhor distribuição do material de reforço pela secção transversal que nesta fase colabora com a capacidade resistente do betão tracionado.

Contudo, a semelhança no comportamento apresentado nesta fase por todas as lajes, deve-se ao baixo nível de reforço utilizado.

Relativamente à resposta apresentada na fase fendilhada (fase II), o material de reforço começa a ter maior influência na rigidez à flexão (ver Figura 5.3 (b)). Nesta fase, após a abertura das primeiras fendas e à medida que mais fendas no betão tracionado vão surgindo, a resposta estrutural fica cada vez mais dependente da contribuição dos varões longitudinais de aço e do laminado de CFRP, em tração. As lajes reforçadas com o a técnica NSM, tendo sido utilizados níveis de reforço praticamente coincidentes, apresentaram uma rigidez à flexão (K_{II}) muito semelhante entre si e superior à laje de referência, como seria expectável. Relativamente às faixas de laje reforçadas com o sistema EBR CFRP, tendo sido estas reforçadas com uma maior taxa de reforço, apresentaram uma rigidez consideravelmente superior às restantes lajes.

Na fase III, relativa à fase de pós cedência das armaduras (ver Figura 5.3 (c)), onde o aumento da carga é assegurado essencialmente pelo laminado de CFRP tracionado, uma rigidez de flexão semelhante (K_{III}) foi obtida em todas as lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP.

Todavia, tanto na fase II como na fase III do comportamento das faixas de laje reforçadas com a técnica NSM, as lajes NSM_L20_P1 e NSM_L20_P2 apresentaram uma rigidez sensivelmente superior às restantes, provavelmente devido à influência da maior concentração de reforço CFRP na zona central da secção transversal da laje, visto que nestas fases, o betão tracionado já se encontra fendilhado e deixa de contribuir para a capacidade portante da faixa de laje. Esta superioridade foi mais pronunciada na laje NSM_L20_P2, onde existe uma maior proximidade entre os dois laminados de CFRP.

Também é destacável o facto da faixa laje NSM_L10_G2 ter apresentado uma rigidez sensivelmente superior à laje NSM_L10_G1 em todas as fases da sua resposta estrutural. Tal situação pode ser justificada pela profundidade da ranhura adotada no reforço da primeira laje ser inferior à pré-executada no betão de recobrimento da segunda, ficando o laminado mais próximo da superfície e fazendo com que a distância entre a força de compressão resultante das tensões de compressão no betão e a força de tração resultante das tensões de tração no laminado, seja ligeiramente superior.

5.3 Modos de rotura

Dependendo da técnica de reforço aplicada, EBR ou NSM, foram observados dois modos de rotura distintos nas faixas de laje ensaiadas, tal como pode ser visualizado na Figura 5.4. As diferenças estão diretamente relacionadas com a eficiência das duas técnicas de reforço à flexão em estruturas de betão armado utilizadas, visto que o mesmo adesivo epoxídico foi utilizado em todas as lajes reforçadas.

Nas lajes reforçadas com a técnica EBR, o modo de rotura observado foi o destacamento do sistema EBR CFRP (ver Figura 5.4 (a), (b) e (c)). Este ocorreu numa fase precoce ao laminado ter atingido a sua resistência à tração, impossibilitando a utilização da sua total capacidade resistente. Este é um modo de rotura típico em elementos de betão armado reforçados à flexão com esta técnica de reforço, amplamente observado pela comunidade científica e reconhecido como uma das suas principais debilidades (Barros *et al.*, 2007; Sena-Cruz *et al.*, 2010; Correia *et al.*, 2015). Contudo, o destacamento do laminado de CFRP ocorreu para valores de carga superiores àqueles que conduziram à cedência da armadura, possibilitando que o comportamento da laje reforçada tenha sido melhorado, tanto para cargas de serviço como na rotura, relativamente à laje de referência. Em ambas as lajes reforçadas com a técnica EBR, o destacamento surgiu no próprio betão com remoção de uma camada deste numa zona próxima ao meio vão, causado pelas fendas de flexão (*Intermediate debonding*) (ver Figura 5.4 (b)). Este modo de rotura reflete a qualidade da aplicação do sistema de reforço e acontece pelo facto de a resistência à tração do adesivo ser superior à do betão. Após o destacamento ter ocorrido numa zona central da faixa de laje, este foi transferindo-se para as extremidades do comprimento de ancoragem, onde a rotura ocorreu na interface entre adesivo e laminado de CFRP (ver Figura 5.4 (c)).

Relativamente às lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP, ocorreu a rotura dos laminados, na zona de flexão pura das faixas de laje, assim que foi atingida a sua resistência à tração e após a plastificação das armaduras (ver Figura 5.4 (d) e (e)). Este facto revela a maior eficiência da utilização desta técnica de reforço relativamente à técnica EBR, onde foi possível esgotar a capacidade resistente do laminado e está de acordo com estudos já realizados nesta área científica (Barros e Fortes, 2005; Hosseini *et al.*, 2014; Cruz, 2016).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5.4 - Modos de rotura observados: (a), (b), (c): rotura por destacamento do laminado de CFRP nas lajes reforçadas com a técnica EBR; (d), (e): rotura do laminado de CFRP por tração nas lajes reforçadas com a técnica NSM.

5.4 Extensões experimentadas pelos materiais das faixas de laje

5.4.1 Laminado de CFRP

A Figura 5.5 apresenta as curvas força *versus* extensão a meio vão no laminado de CFRP, ao longo do ensaio das faixas de laje. A leitura das extensões foi estabelecida a partir do extensómetro SG4, instalado na secção de meio vão da superfície dos laminados. Os valores finais de extensão apresentados nas curvas da Figura 5.5, correspondem à extensão registada pelo extensómetro SG4 no instante em que a carga máxima (F_{\max}) foi atingida, isto é, no instante em que ocorre a rotura por tração do laminado de CFRP nas faixas de laje reforçadas com o sistema NSM CFRP e no instante da rotura por destacamento do laminado nas faixas de laje reforçadas com o sistema EBR CFRP.

Contudo, a máxima extensão nem sempre foi registada no extensómetro SG4, sendo por vezes o extensómetro SG7 ou o extensómetro colocado na secção de carregamento (SG5) a experimentar extensões mais elevadas. Os referidos valores de máxima extensão experimentada pelos laminado de CFRP ($\varepsilon_{f\max}$) foram incluídos na Tabela 5.1 e serão posteriormente analisados neste documento.

Complementarmente às curvas força *versus* extensão a meio vão no laminado, apresentadas na Figura 5.5, na Figura 5.6 está representada a distribuição das extensões ao longo do eixo longitudinal dos laminados de CFRP, para vários níveis de carregamento. Os níveis de carga selecionados compreendem cada uma das fases do comportamento à flexão das faixas de laje reforçadas, mais concretamente (i) a fase elástica, (ii) a fase fendilhada e (iii) a fase pós-cedência da armadura longitudinal. Os valores de extensões foram os monitorizados pelos extensómetros SG4, SG5 e SG6 nas faixas de laje reforçadas com o sistema NSM CFRP, e pelos extensómetros SG4, SG5, SG6 e SG7 nas faixas de laje reforçadas com o sistema EBR CFRP.

A disposição dos extensómetros instalados na superfície dos laminados de CFRP foi apresentada no Capítulo 3, na secção referente à geometria e configuração de ensaio (ver Figura 3.10).

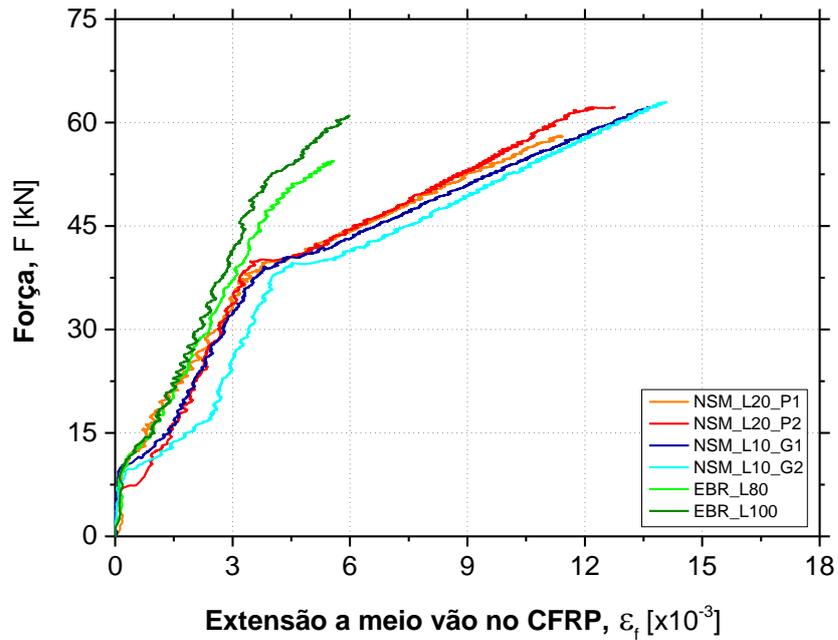


Figura 5.5 - Curvas força *versus* extensão a meio vão no laminado de CFRP relativas a cada uma das faixas de laje.

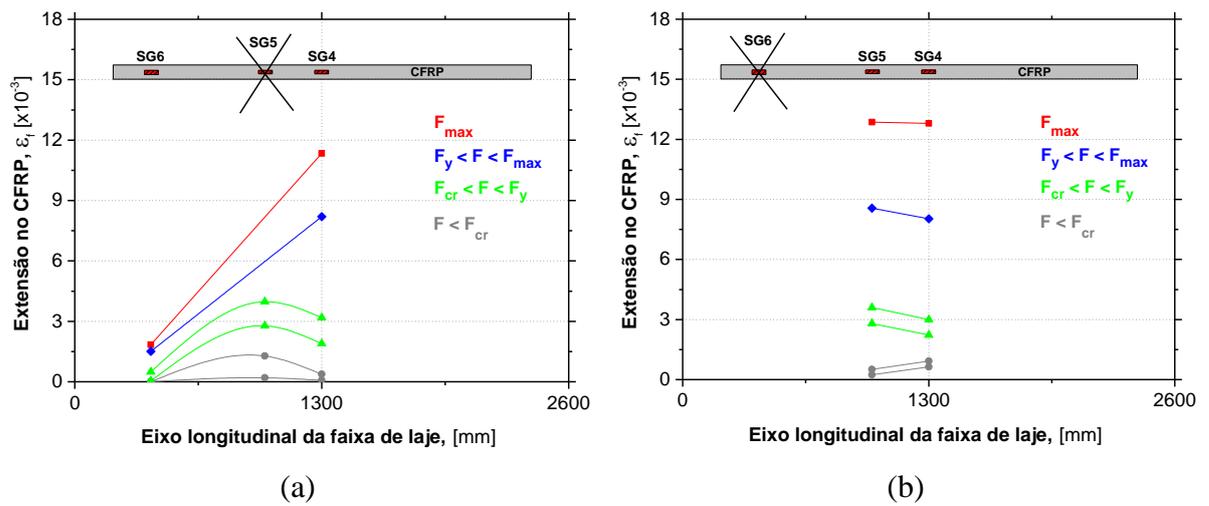


Figura 5.6 - Distribuição das extensões ao longo do eixo longitudinal dos laminados de CFRP, para vários níveis de carregamento, em cada uma das faixas de laje reforçadas: (a) NSM_L20_P1; (b) NSM_L20_P2; (c) NSM_L10_G1; (d) NSM_L10_G2; (e) EBR_L80; (f) EBR_L100.

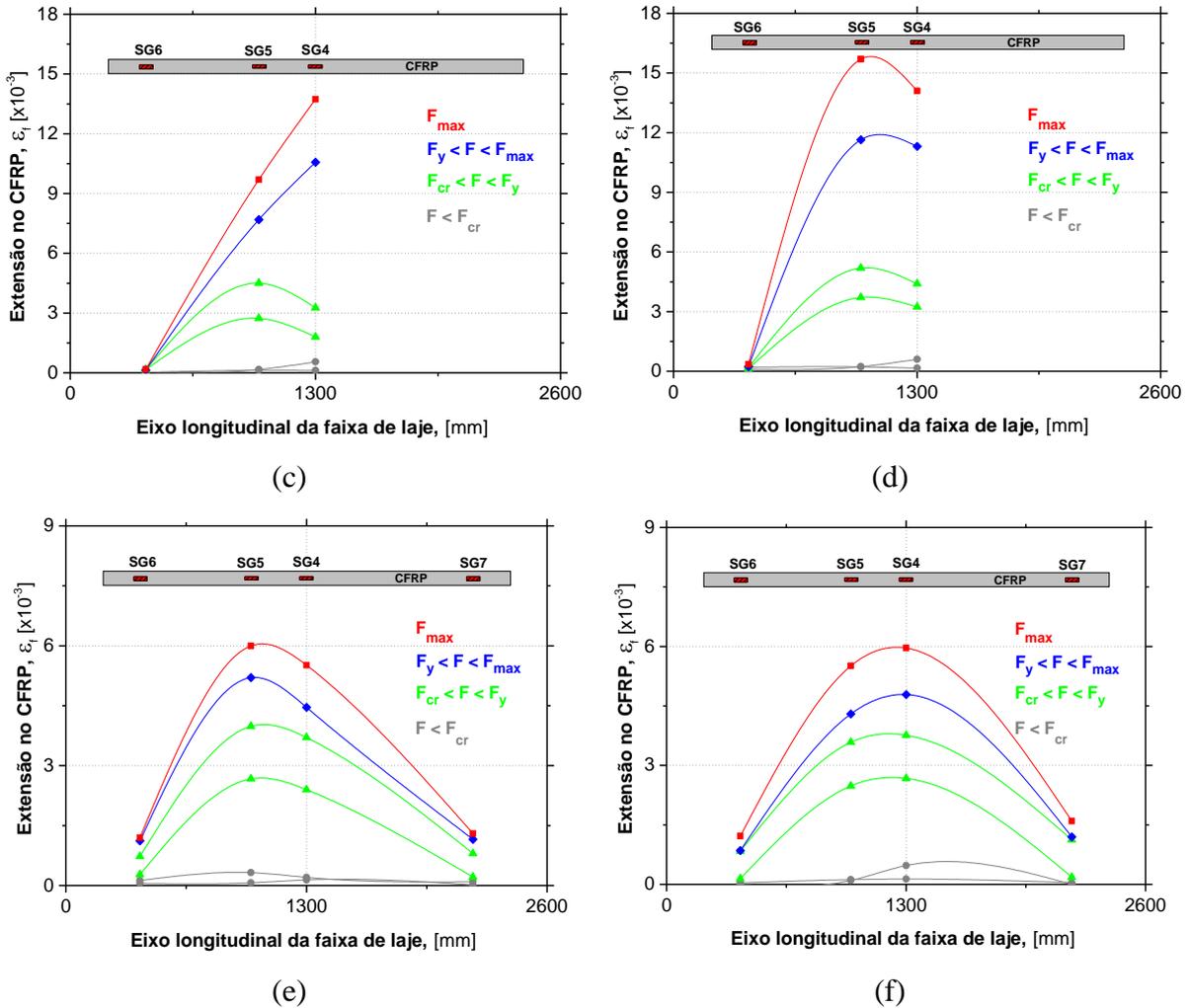


Figura 5.6 (cont.) - Distribuição das extensões ao longo do eixo longitudinal dos laminados de CFRP, para vários níveis de carregamento, em cada uma das faixas de laje reforçadas: (a) NSM_L20_P1; (b) NSM_L20_P2; (c) NSM_L10_G1; (d) NSM_L10_G2; (e) EBR_L80; (f) EBR_L100.

Partindo da análise da evolução das extensões apresentada na Figura 5.5, e tal como tinha sido observado nas curvas força *versus* deslocamento a meio vão (ver Figura 5.1), são observadas três fases de comportamento distintas.

Na fase elástica, o laminado encontra-se pouco solicitado até ao instante em que o betão inicia o processo de fendilhação. Assim que este se inicia e, progressivamente vai deixando de contribuir para a rigidez global do sistema, a extensão do laminado tem um aumento significativo. Nesta fase, para uma dada força aplicada, as extensões experimentadas pelo laminado das lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP são superiores às monitorizadas nas lajes reforçadas com o sistema EBR CFRP, devido a estas últimas terem sido reforçadas com

maior taxa de reforço. Este aspeto é mais pronunciado na laje EBR_L100 devido à maior largura de secção transversal do laminado, que proporciona uma maior superfície de contacto entre a superfície de betão e o laminado de CFRP. Relativamente às faixas de laje reforçadas com a técnica NSM, as reforçadas com dois laminados de CFRP (NSM_L20_P1 e NSM_L20_P2) apresentam menores extensões no laminado, para uma dada força aplicada, relativamente às lajes onde a solução de reforço passou pela instalação de quatro laminados (NSM_L10_G1 e NSM_L10_G2). Este aspeto reflete a maior capacidade de transferência de tensões para o laminado de CFRP quando a solução de reforço com quatro laminados é utilizada, devido à sua maior distribuição ao longo da secção transversal da faixa de laje.

Na terceira fase de comportamento estrutural das faixas de laje, na qual as armaduras longitudinais tracionadas já se encontram plastificadas e o laminado de CFRP é o responsável pela sua capacidade de carga, as mesmas ilações da fase fendilhada podem ser retiradas. Um aspeto importante notar é o facto das lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP permitirem que o laminado de CFRP possa experimentar extensões muito superiores comparativamente com a solução que recorre a laminados colados externamente à superfície. Este aspeto está diretamente relacionado com a eficiência das duas técnicas de reforço e com os modos de rotura que ocorreram. De facto, as lajes reforçadas com a técnica NSM permitiram ao laminado esgotar a sua capacidade resistente de tração, enquanto nas lajes reforçadas com a técnica EBR, devido ao destacamento precoce do sistema de reforço, apenas se usufruiu de aproximadamente 40% da sua capacidade resistente.

5.4.2 Armadura longitudinal tracionada

A Figura 5.7 apresenta a evolução das extensões experimentadas pelos varões longitudinais de aço tracionados, ao longo do ensaio de flexão. Os valores de extensão apresentados foram monitorizados pelo extensómetro SG1, instalado na secção de meio vão do varão central (ver disposição dos extensómetros na Figura 3.10 do Capítulo 3). Os valores finais de extensão apresentados correspondem à extensão da armadura no instante em que a força máxima (F_{max}) é atingida.

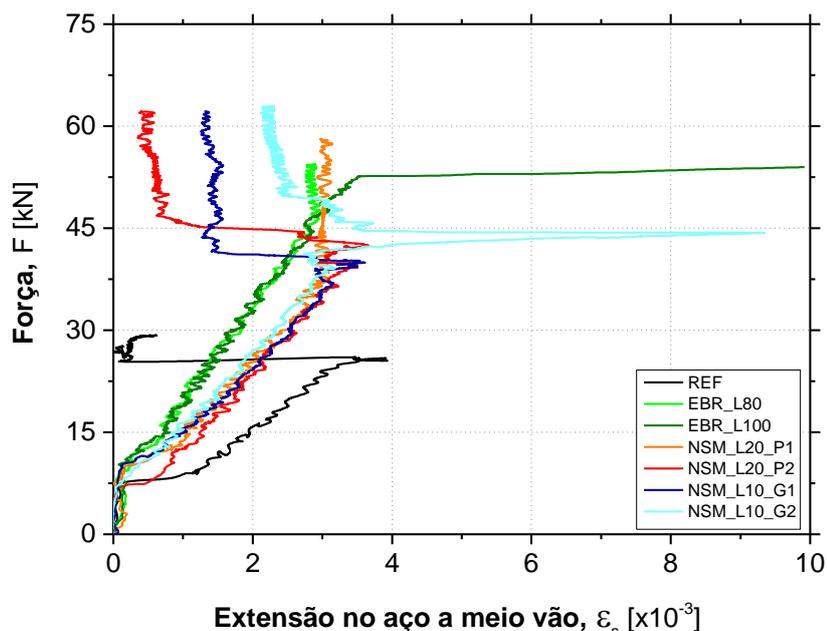


Figura 5.7 - Curvas força *versus* extensão no aço tracionado a meio vão das faixas de laje.

Antes de surgirem as primeiras fendas no betão tracionado, as extensões no aço são muito reduzidas, em conformidade com o que tinha sido verificado na evolução das extensões dos laminados de CFRP.

Assim que o processo de fendilhação no betão é iniciado, observa-se um aumento significativo das extensões experimentadas pelos varões de aço, refletindo a sua maior sollicitação. Nesta fase, é desde logo notada a maior sollicitação dos varões longitudinais da laje de referência relativamente às lajes reforçadas, devido à ausência de material de reforço que colabore na capacidade resistente da laje. A evolução das extensões na armadura das lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP, demonstra ser muito similar devido ao facto de todas elas terem sido reforçadas com uma taxa de reforço equivalente praticamente coincidente. Nas lajes reforçadas com o sistema EBR CFRP, para uma dada força aplicada, as extensões na armadura demonstram ser inferiores relativamente às experimentadas pelos varões das lajes reforçadas com a técnica NSM, o que demonstra a sua menor sollicitação justificada pela maior quantidade de reforço FRP utilizado. A taxa de reforço longitudinal equivalente utilizado no reforço das lajes, também influenciou o valor da carga de cedência das armaduras (F_y), proporcionando

valores superiores nas lajes reforçadas com o sistema EBR CFRP relativamente às lajes reforçadas com a técnica NSM (estas últimas apresentaram valores muito próximos de F_y).

A partir do momento em que a armadura tracionada plastifica e a fase de pós-cedência das armaduras se inicia, a análise da evolução das extensões no aço torna-se mais complexa. Nesta fase, as extensões registadas estão muito dependentes do posicionamento do extensómetro. A Figura 5.8 apresenta o possível posicionamento dos extensómetros instalados na armadura. O extensómetro 1 encontra-se localizado numa zona onde surgiu uma fenda primária de flexão, enquanto que o extensómetro 2 está situado numa zona entre fendas. Sendo assim, na zona do extensómetro 1 adivinham-se tensões na armadura mais elevadas e, conseqüentemente, maiores extensões experimentadas, visto que, face à abertura de uma fenda primária nessa zona, a tensão no betão é nula. Ilações opostas são retiradas para o extensómetro 2.

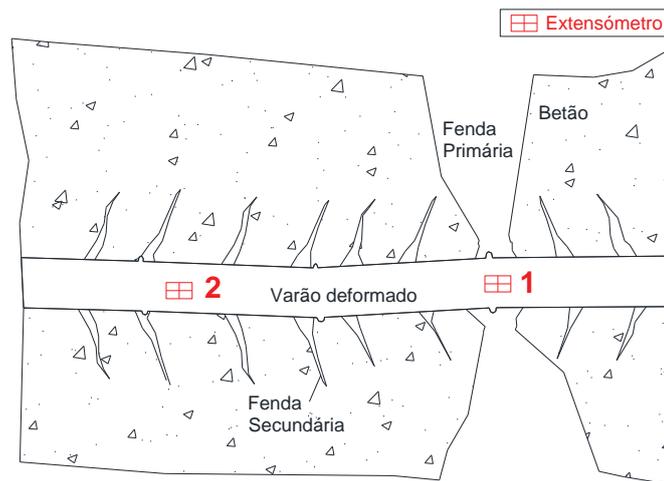


Figura 5.8 - Possível posição dos extensómetros colocados na armadura.

Analisando a evolução das extensões após a plastificação das armaduras longitudinais (ver Figura 5.7), conclui-se que, muito provavelmente, os extensómetros instalados na armadura das lajes EBR_L100 e NSM_L10_G2, estavam localizados numa zona onde uma fenda primária tenha surgido (tal como o extensómetro 1 da Figura 5.8), o que pode justificar o aumento das extensões devido às tensões mais elevadas que o aço experimenta nessa zona. Pelas razões contrárias, os restantes extensómetros deviam encontrar-se numa zona entre fendas primárias (tal como extensómetro 2 da Figura 5.8). Contudo, não foi possível realizar uma inspeção às faixas de laje para este facto ser constatado. Em alguns casos, após a cedência das armaduras longitudinais, registou-se uma diminuição das extensões, possivelmente devido à formação de

rótulas plásticas que fez com que tenha existido uma diminuição da curvatura dos varões de aço e uma menor concentração de tensões nas secções onde os extensómetros estavam instalados.

5.4.3 Betão comprimido

A Figura 5.9 apresenta a evolução das extensões no betão comprimido a meio vão, no decorrer do ensaio de flexão das faixas de laje. A sua monitorização foi realizada através da instalação do extensómetro SG3 nessa secção da laje, tal como foi descrito no Capítulo 3 (ver Figura 3.11 (a)). Nas curvas força *versus* extensão apresentadas, não constam os resultados da laje NSM_L20_P2 devido a algumas perturbações que existiram na monitorização da extensão, não tornando a resposta obtida representativa do comportamento real.

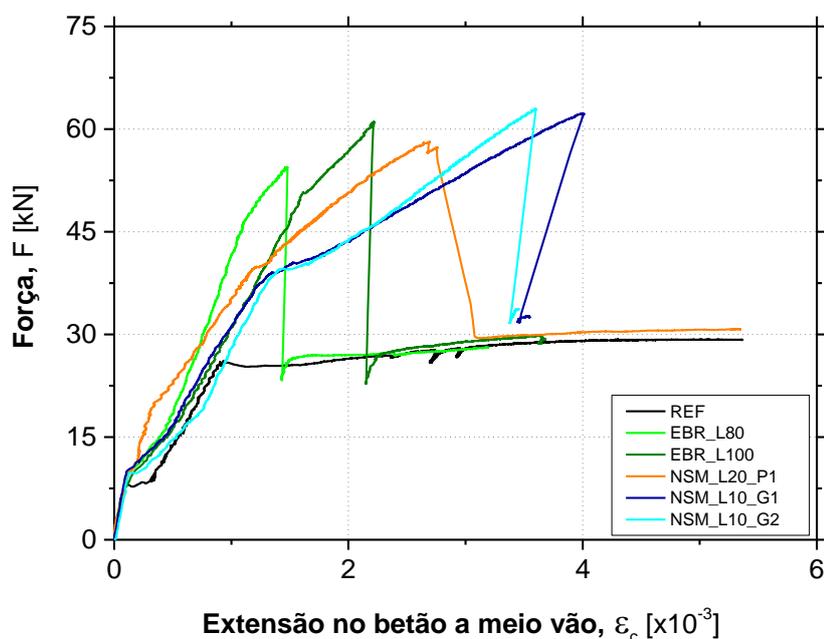


Figura 5.9 - Curvas força *versus* extensão no betão comprimido a meio vão das faixas de laje.

Na fase elástica, antes do início do processo de abertura de fendas, a extensão no betão comprimido é relativamente reduzida em todas as faixas de laje. Com o início da fendilhação, a extensão no betão aumenta significativamente, traduzindo a sua maior solicitação nesta fase. O aumento da extensão no betão comprimido é ainda mais pronunciado quando a armadura longitudinal tracionada plastifica. Nesta fase, comparando a evolução das extensões no betão das lajes reforçadas relativamente à laje de referência, para que este experimente a mesma

extensão, é necessária uma carga muito superior nas primeiras, refletindo uma grande influência da utilização dos laminados de CFRP.

Nas lajes reforçadas com o sistema EBR CFRP, as extensões no betão comprimido registadas no instante em que a força máxima (F_{max}) é atingida são significativamente menores do que as que foram monitorizadas nas lajes reforçadas com a técnica NSM, mesmo que nas primeiras tenha sido utilizada uma taxa de reforço superior. A rotura por destacamento prematuro do laminado de CFRP, quando aplicada a técnica EBR, para além de não permitir que se usufrua da totalidade da capacidade resistente do laminado de CFRP, também não permitiu que o betão por compressão experimentasse elevadas extensões para valores de carga próximos de F_{max} , ao contrário do que se verificou nas lajes reforçadas com a técnica NSM. Nestas, o facto de ter sido possível esgotar a capacidade resistente dos laminados tracionados permitiu ao betão em compressão experimentar extensões mais elevadas quando a carga se aproximava do valor máximo.

Comparando a resposta das lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP, é notável o melhor aproveitamento da capacidade resistente à compressão do betão nas lajes reforçadas com quatro laminados de CFRP (NSM_L10_G1 e NSM_L10_G2), relativamente à laje NSM_L20_P1, conseguindo experimentar extensões mais elevadas quando a carga máxima foi atingida.

5.5 Análise do nível de fendilhação

A análise do nível de fendilhação apresentado pelas faixas de laje tem um papel preponderante na avaliação da eficiência da solução de reforço adotada. Assim, durante os ensaios de flexão, foi monitorizada a evolução da largura de fendas de modo a perceber-se em que medida a solução de reforço utilizada limitava a sua progressão. Após os ensaios, também se procedeu à análise do padrão de fendilhação de cada uma das faixas de laje, onde parâmetros como o número de fendas principais, a distância média entre fendas e a extensão da banda de fendilhação foram investigados, permitindo retirar ilações qualitativas da solução de reforço adotada, avaliar a sua capacidade em limitar a distância entre fendas e perceber a sua capacidade em promover uma melhor distribuição de tensões pela faixa de laje.

5.5.1 Evolução da largura de fendas

A largura de fendas foi monitorizada através da utilização de um microscópio portátil USB, com um fator de ampliação de 20×. Com esse intuito, foram selecionadas três fendas na zona de flexão pura de cada uma das faixas de laje, duas sob os pontos de aplicação de carga e uma a meio vão. Para cada fotografia tirada pelo microscópio, três medições foram realizadas de modo a ser obtida a largura média da fenda. A Figura 5.10 apresenta o modo como se procedeu à monitorização, onde se encontram destacadas as três fendas nas quais a evolução da largura foi avaliada (numeradas de 1 a 3) e de que forma se procedeu à sua medição. A Figura 5.11 apresenta a evolução da largura média de fenda *versus* a força aplicada, para cada uma das faixas de laje. As medições da largura de fendas nas lajes reforçadas foram realizadas desde o seu aparecimento até uma força aplicada entre 35 e 40 kN, por razões de segurança, enquanto na laje de referência a monitorização foi realizada até uma carga de aproximadamente 25 kN, pelas mesmas razões. O intervalo de carga seleccionado foi representativo da evolução da largura de fendas entre o início do seu processo de abertura (quando atingida a F_{cr}), até ser atingida a força relativa à plastificação da armadura longitudinal de tração (F_y). Nesta fase, a largura média de fendas aumenta de forma linear, tal como demonstram os coeficientes de correlação das retas de tendência apresentados na Figura 5.11 (muito próximos do valor unitário). A partir desta fase, a evolução da largura de fendas deixaria de seguir a linearidade verificada até então e aumentaria de forma mais abrupta.

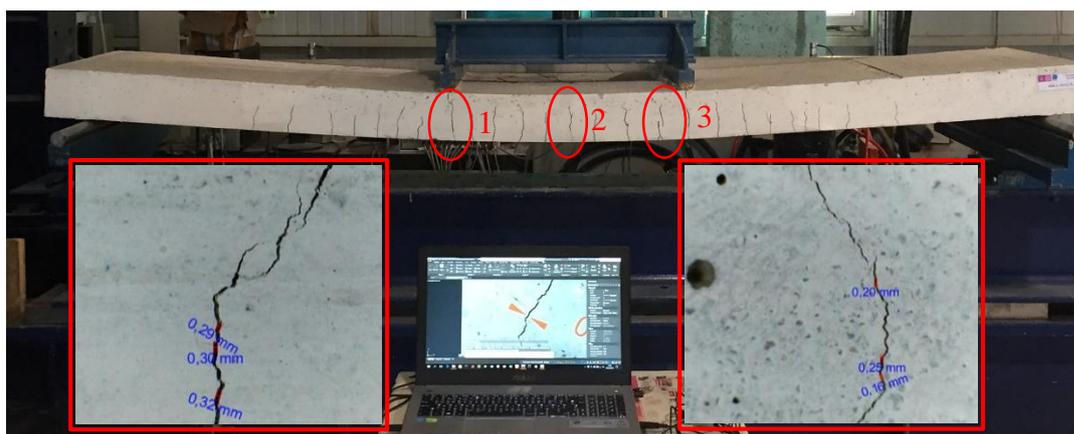


Figura 5.10 - Monitorização da evolução da largura de fendas.

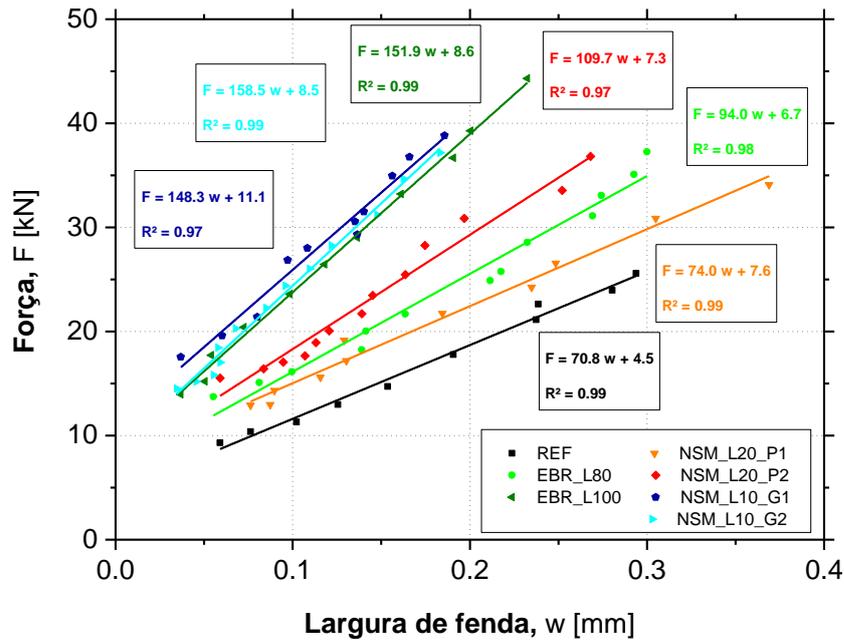


Figura 5.11 - Evolução da largura de fendas.

Partindo da análise dos resultados obtidos apresentados na Figura 5.11, desde logo é observado que, para um dado nível de carregamento, todas as lajes reforçadas exibem menor largura de fendas relativamente à laje de referência e apresentam maior declive das retas de tendência linear, o que reflete a sua maior capacidade no controlo da evolução da sua largura, tal como tem vindo a ser verificado por outros autores (Correia *et al.*, 2015; Teixeira *et al.*, 2014).

Comparando os resultados relativos às lajes reforçadas com o sistema EBR CFRP, pode ser avaliada a influência da largura da secção transversal do laminado utilizado no seu reforço. Na laje EBR_L100, o declive da reta de tendência que traduz a evolução da largura de fenda é significativamente superior quando comparado ao da laje EBR_L80, o que reflete a sua maior capacidade no controlo da progressão da largura de fenda. De facto, para um dado nível de carregamento, a largura de fenda da laje EBR_L80 é bastante superior à largura apresentada pela fenda da laje EBR_L100. Assim, pode ser concluído que a largura do laminado adotado no reforço à flexão da faixa de laje com a técnica EBR, teve uma grande influência no controlo da progressão da largura de fendas. Esta situação já era expectável com a análise das curvas força *versus* deslocamento vertical a meio vão, apresentadas na Figura 5.1, na fase entre a abertura das primeiras fendas e a cedência da armadura longitudinal, onde para o mesmo valor de carga aplicada, os deslocamentos verticais registados a meio vão foram superiores na laje EBR_L80.

Relativamente aos resultados obtidos nas lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP, a influência das duas principais soluções de reforço pode ser avaliada comparando a evolução da largura de fendas das lajes reforçadas com dois laminados de CFRP (NSM_L20_P1 e NSM_L20_P2) com as lajes que recorreram a quatro laminados no seu reforço à flexão (NSM_L10_G1 e NSM_L10_G2). Lembra-se que em todas as lajes foi aplicada a mesma quantidade de material compósito, tal como foi detalhado no Capítulo 3. Nas lajes reforçadas com quatro laminados de CFRP, o controlo do aumento da largura de fendas demonstra ser muito mais eficiente, traduzido pelo maior declive das retas de tendência. Assim, para o mesmo nível de carga aplicada, a largura apresentada pelas fendas das lajes reforçadas com dois laminados de CFRP é significativamente superior à registada nas lajes reforçadas com quatro laminados. Com estes resultados, pode ser concluído que com a maior distribuição do material de reforço ao longo da secção transversal das faixas de laje, o controlo da progressão da largura de fendas é significativamente mais eficiente.

Nas lajes reforçadas com dois laminados de CFRP de acordo com a técnica NSM, um melhor controlo da evolução da largura de fendas foi verificado na laje NSM_L20_P2, relativamente à laje NSM_L20_P1. A primeira, para um dado nível de carregamento, apresenta uma largura de fendas inferior à da laje NSM_L20_P1, para além do facto de o declive da reta de tendência ser consideravelmente superior, o que significa que oferece uma maior resistência ao aumento da largura de fendas. Assim, pode ser concluído que quando os laminados foram instalados mais próximos da zona central da faixa de laje e menos distanciados entre si, um melhor controlo na progressão da largura de fendas foi obtido.

A influência da profundidade a que o laminado é inserido no betão de recobrimento das lajes reforçadas com a técnica NSM, pode ser analisada comparando os resultados obtidos pela laje NSM_L10_G1 e NSM_L10_G2. Ambas apresentaram um comportamento muito semelhante no controlo da evolução da largura de fendas, pois, para o mesmo nível de carregamento, a largura de fendas registada foi muito próxima. Contudo, a laje NSM_L10_G2, onde o laminado se encontra mais próximo da superfície, apresenta um declive da reta de tendência sensivelmente superior, o que pode significar que exhibe um controlo mais eficiente, apesar de

para um mesmo valor de carga aplicada, a largura de fenda ser sensivelmente superior à monitorizada na laje NSM_L10_G1.

5.5.2 Padrões de fendilhação

No final dos ensaios de flexão das faixas de laje, foram analisados os respectivos padrões de fendilhação ao nível da face inferior e da face lateral. Estes encontram-se apresentados na Figura 5.12 após todas as fendas terem sido marcadas a cor preta. Desde logo, foi notado que a presença do material de reforço permitiu aumentar o número de fendas e a extensão da banda de fendilhação, que atingiu secções mais afastadas de laje, não se restringindo apenas à zona de flexão pura. Além disso, foi perceptível a maior densidade de fendas apresentada pelas lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP, relativamente às lajes reforçadas com a técnica EBR e laje de referência. Esta situação foi ainda mais pronunciada quando quatro laminados foram utilizados no reforço à flexão das faixas de laje (caso da laje NSM_L10_G1 e NSM_L10_G2).

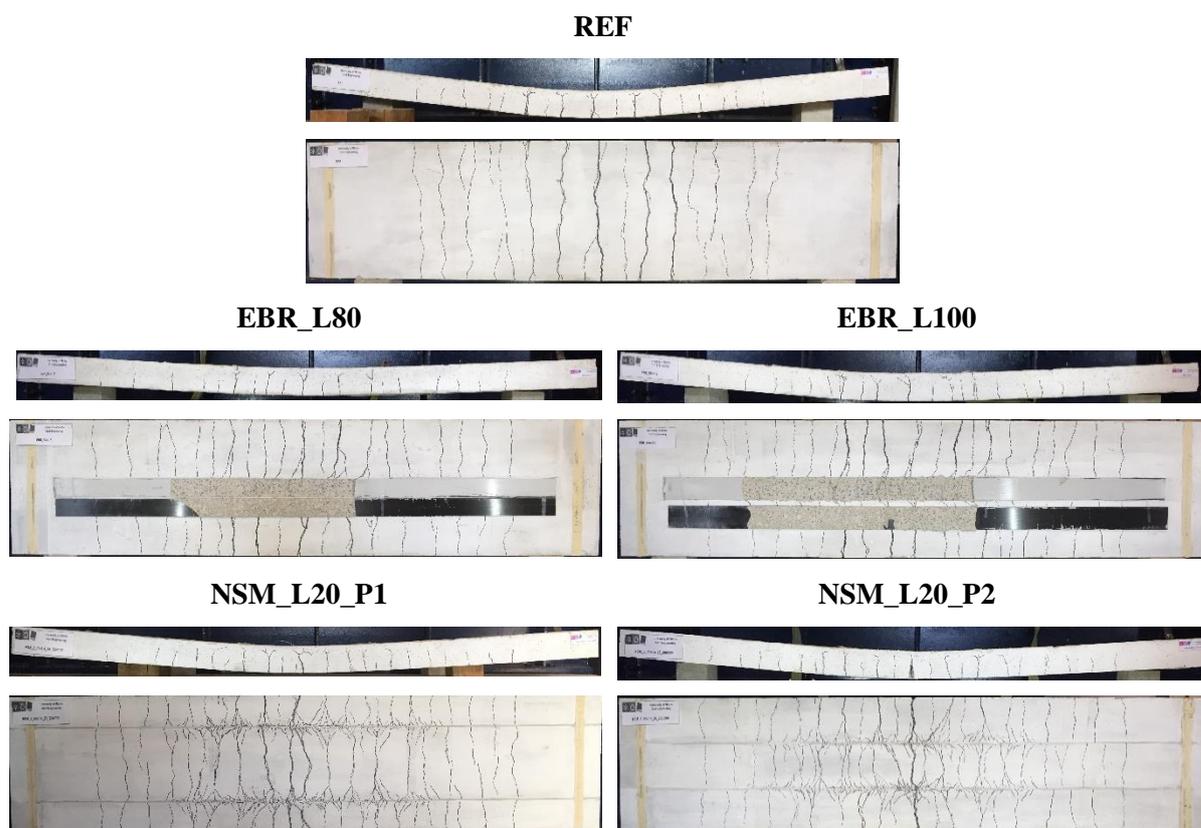


Figura 5.12 - Padrões de fendilhação observados após os ensaios de flexão das faixas de laje.

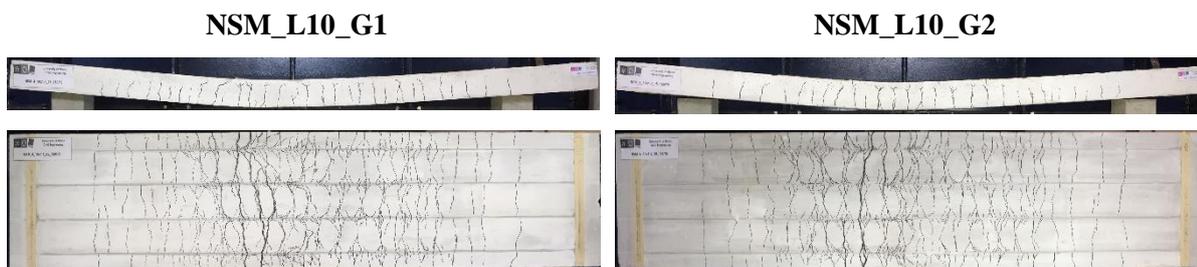


Figura 5.12 (cont.) - Padrões de fendilhação observados após os ensaios de flexão das faixas de laje.

As lajes reforçadas com a técnica EBR parecem apresentar uma distância entre fendas muito semelhante à apresentada pela laje de referência, apesar de apresentarem uma maior extensão da zona fendilhada. Nestas são visualizadas fendas de flexão primárias que resultaram do facto das tensões de tração no betão terem excedido a sua resistência. Com o aumento do nível de carregamento, estas foram intersetando a área de ancoragem do laminado de CFRP, onde se verifica alguma inclinação das tensões principais.

Por sua vez, nas lajes reforçadas com a técnica NSM, o típico padrão de fendilhação apresentado é constituído por fendas de flexão primárias e por fendas de deslizamento do laminado secundárias. As primeiras, formam-se maioritariamente até aos níveis de carga de cedência das armaduras, sobretudo na zona de flexão pura, enquanto que as segundas se formam para um nível de carregamento superior a esse, devido ao deslizamento do laminado de CFRP em relação ao betão. Para melhor compreensão e distinção dos dois tipos de fendas que se formam nas lajes reforçadas com a técnica NSM, a Figura 5.13 apresenta, com detalhe, o padrão de fendilhação obtido após o ensaio da laje NSM_L20_P1, na sua zona de flexão pura (entre pontos de carga).

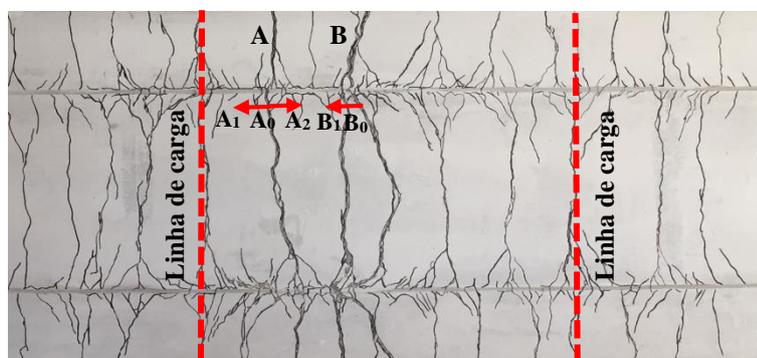


Figura 5.13 - Padrão de fendilhação na zona de flexão pura da laje NSM_L20_P1.

As fendas denominadas “A” e “B”, representam duas fendas primárias de flexão e surgiram quando as tensões de tração, devido à flexão da laje, excederam a respetiva resistência do betão nessas secções. Com o aumento do nível de carregamento, estas fendas primárias vão intercedendo os laminados e, conseqüentemente, ocorre deslizamento da interface entre laminado de CFRP e betão, o que resulta em pequenas ramificações de fendas diagonais em zonas circundantes às fendas de flexão. Este comportamento de ramificação de fendas está de acordo com as típicas fendas em forma de “espinha de peixe” (*herringbone*) associadas à fendilhação por esforços de corte de elementos de betão armado. Neste caso, as fendas secundárias têm a mesma inclinação das tensões principais de tração que excederam a resistência à tração local no betão, causadas pelas tensões de aderência transferidas entre o laminado e o betão circundante durante o processo de deslizamento do CFRP. Como é visível na Figura 5.13, as fendas secundárias propagam-se em cada fenda primária de flexão em ambas as direções tal como de “A₀ a A₁” e de “A₀ a A₂”, na fenda “A” e de “B₀ a B₁” na fenda “B”. Isto significa que entre duas fendas de flexão primárias ocorre uma inversão no sentido do deslizamento e das tensões de aderência e, conseqüentemente, existe um ponto onde o deslizamento é nulo entre estas. Este comportamento observado está de acordo com estudos já realizados em elementos de betão armado reforçados à flexão com a técnica NSM, e.g. Liu *et al.* (2006), Bonaldo *et al.* (2007), e Oehlers *et al.* (2008).

No caso das lajes reforçadas com quatro laminados de CFRP (NSM_L10_G1 e NSM_L10_G2), a direção das tensões principais de tração no betão circundante dos laminados aproxima-se mais da própria orientação dos laminados, surgindo uma maior densidade de fendas ortogonais aos laminados (ver Figura 5.12). Assim, pode ser concluído que a solução de reforço com quatro laminados de CFRP permitiu reduzir o espaçamento entre fendas de flexão primárias, relativamente às lajes reforçadas com 2 laminados (NSM_L20_P1 e NSM_L20_P2), o que permite ao laminado ser mais solicitado ao longo do seu desenvolvimento longitudinal e as suas propriedades resistentes sejam melhor aproveitadas, tal como foi verificado na análise das curvas força *versus* extensão no laminado de CFRP (ver Figura 5.5). As porções de laminado que se encontram nas secções onde surgiram fendas primárias são zonas de concentração de tensões e, quanto mais secções de laminado nessas condições existirem e mais próximas elas se encontrarem, mais eficiente é a sua distribuição, tal como foi verificado nas lajes reforçadas com quatro laminados de CFRP. Prova disso é o facto de nas lajes reforçadas com a técnica

NSM, após a rotura do laminado de CFRP, ser facilmente observável a zona onde esta ocorreu, visto que ocorre numa zona onde surge uma fenda primária (ver Figura 5.4 (d) e (e)).

5.5.3 Número de fendas, distância média entre fendas e extensão da banda de fendilhação

Com o objetivo de caracterizar o padrão de fendilhação obtido em cada uma das faixas de laje, após os ensaios de flexão, foram determinados os seguintes parâmetros: (i) número de fendas de flexão primárias, (ii) distância média entre fendas e (iii) extensão da banda de fendilhação. O objetivo foi perceber a eficiência das diferentes soluções de reforço através da análise do padrão de fendilhação apresentado, complementando as conclusões retiradas anteriormente com a sua análise visual. A Figura 5.14 apresenta o modo como os referidos parâmetros foram determinados para cada uma das faces laterais das faixas de laje que ficam expostas durante o ensaio. O número de fendas corresponde à contagem do número total de fendas de flexão primárias, entre as quais foi registada a distância de modo a ser obtida a distância média entre fendas de cada uma das faixas de laje. Complementarmente, foi medida a extensão da banda de fendilhação, tal como demonstrado na Figura 5.14.

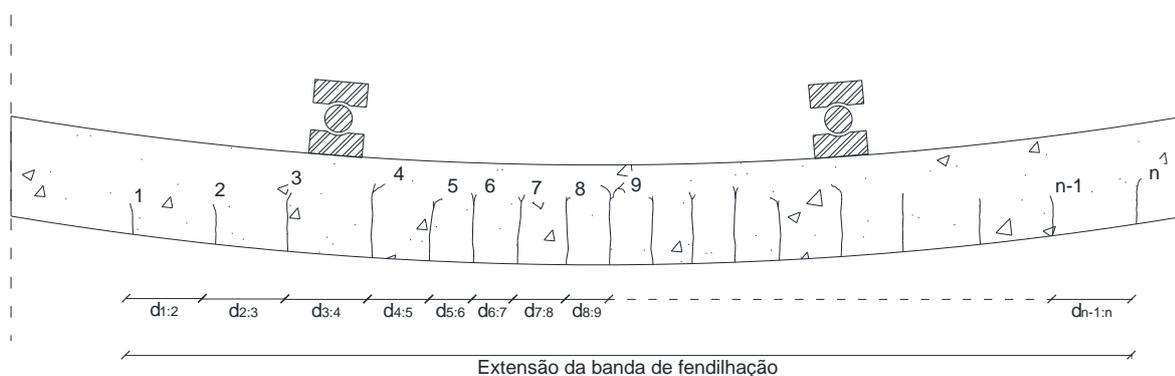


Figura 5.14 - Contagem do número de fendas, determinação da distância média entre fendas e medição da extensão da banda de fendilhação.

Os resultados obtidos para cada um dos três parâmetros aplicados aos padrões de fendilhação observados em cada uma das faixas de laje, estão apresentados na Figura 5.15. Numa primeira análise é verificado um aumento da quantidade de fendas de flexão primárias nas lajes

reforçadas, relativamente à laje de referência, bem como um aumento significativo da extensão da banda de fendilhação, que tendeu a afastar-se da zona de flexão pura (entre pontos de carga).

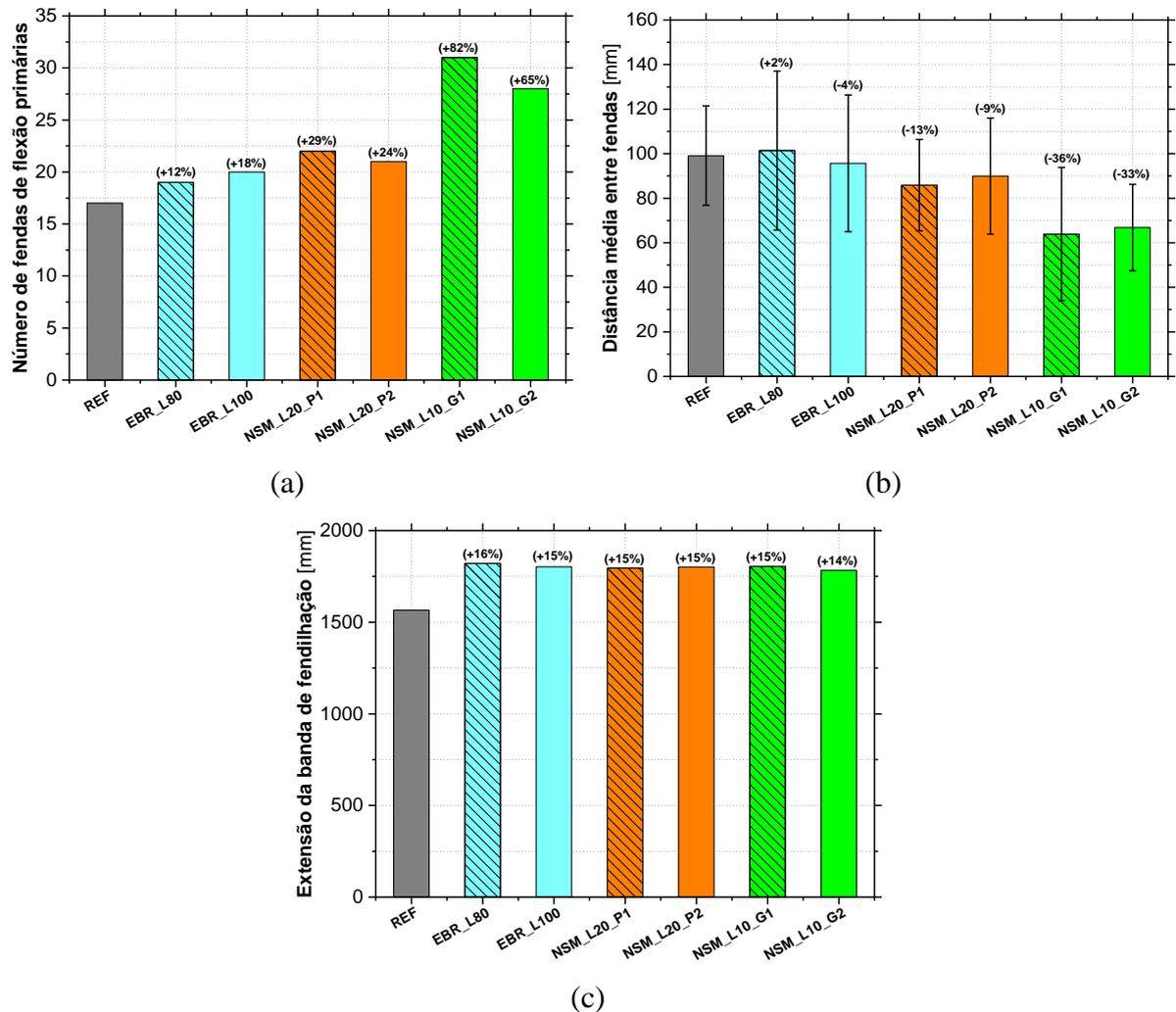


Figura 5.15 - Caracterização do padrão de fendilhação: (a) número de fendas primárias; (b) distância média entre fendas; (c) extensão da banda de fendilhação.

Nota: os valores entre parêntesis representam o aumento percentual do respetivo parâmetro, relativamente à laje de referência.

Mesmo com menor taxa de reforço longitudinal utilizado, as lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP apresentaram uma maior quantidade de fendas primárias de flexão relativamente às lajes reforçadas com a técnica EBR, devido ao material de reforço se encontrar mais distribuído ao longo da secção transversal da faixa de laje. Assim, foi permitido um melhor controlo da distância entre fendas, reduzindo-a significativamente em relação às lajes reforçadas com o sistema EBR CFRP, cujo padrão de fendilhação se aproximou do obtido pela laje de referência.

Relativamente à laje de referência, as lajes EBR_L80 e EBR_L100 aumentaram a quantidade de fendas primárias de flexão em 12% e em 18%, respetivamente. Contudo, a distância média entre fendas obtida pela primeira foi superior à obtida pela laje de referência, num valor marginal de 2%, enquanto a laje EBR_L100 permitiu reduzir a mesma distância em cerca de 4%.

Em termos de extensão da banda de fendilhação, todas as lajes reforçadas (EBR e NSM) registaram valores muito próximos (aumentos entre 14% e 16% relativamente à laje de referência), não tendo sido verificada a influência do tipo de reforço.

Nas lajes NSM_L20_P1 e NSM_L20_P2, registou-se, respetivamente, um aumento do número de fendas primárias de flexão em 29% e 24%, relativamente à laje de referência. Em termos de distância média entre fendas, esta foi reduzida em 13% e 9%, respetivamente. Em relação às lajes NSM_L10_G1 e NSM_L10_G2, o sistema de reforço adotado permitiu aumentar o número de fendas em 82% e 65%, e reduzir a distância média entre fendas em 36% e 33%, respetivamente e em relação à laje de referência. Tal como tinha sido concluído com a análise visual dos padrões de fendilhação obtidos, as lajes reforçadas com quatro laminados foram significativamente mais eficientes na limitação da distância média entre fendas primárias de flexão, permitindo que estas surgissem de forma mais densificada. Este comportamento reflete a influência da maior distribuição do material de reforço ao longo da secção transversal da faixa de laje, que permitiu uma utilização mais eficaz da capacidade resistente dos materiais envolvidos.

Comparando os resultados obtidos pelas lajes NSM_L20_P1 e NSM_L20_P2, é possível perceber a influência da aproximação dos laminados na secção transversal da laje. Na primeira, os laminados encontravam-se mais distanciados enquanto na segunda a distância entre estes era mais reduzida, localizando-se em secções mais próximas da zona central da faixa de laje. Apesar da proximidade de resultados, a laje NSM_L20_P1 permitiu aumentar o número total de fendas de flexão primárias e reduzir a distância média entre estas, relativamente à laje NSM_L20_P2.

Se os resultados obtidos pelas lajes NSM_L10_G1 e NSM_L10_G2 forem comparados, conclusões sobre a influência da profundidade a que os laminados de FRP são inseridos no betão de recobrimento da laje, podem ser retiradas. Apesar de também terem sido obtidos resultados muito próximos, na laje cujos laminados foram instalados em maior profundidade (laje NSM_L10_G1), uma quantidade sensivelmente superior de fendas foi obtida relativamente à laje NSM_L10_G2, para além de ter apresentado uma menor distância média entre estas.

5.6 Influência das várias soluções de reforço no comportamento à flexão das faixas de laje

De forma a analisar a influência das várias soluções de reforço utilizadas e dos vários parâmetros estudados, nesta secção é apresentada uma análise comparativa dos principais resultados obtidos na resposta à flexão das faixas de laje. Os seguintes parâmetros serão analisados e comparados: (i) forças registadas no início do processo de fendilhação (F_{cr}), na cedência das armaduras (F_y) e a carga máxima atingida (F_{max}), bem como os respetivos deslocamentos verticais a meio vão das faixas de laje (δ_{cr} , δ_y e δ_{max} , respetivamente), (ii) extensão máxima experimentada pelo laminado de CFRP (ϵ_{fmax}) e (iii) a ductilidade que cada solução de reforço foi capaz de proporcionar, através do parâmetro δ_{max}/δ_y . Em cada um dos parâmetros referidos anteriormente, será analisada a influência dos seguintes fatores: (i) técnica de reforço utilizada, (ii) largura do laminado quando adotada a técnica EBR no reforço das faixas de laje, (iii) diferentes distribuições do material de reforço ao longo da secção transversal da laje, bem como a distância adotada entre laminados e a profundidade a que estes são inseridos no betão de recobrimento, nas lajes reforçadas com a técnica NSM.

5.6.1 Carga de início de fendilhação

A Figura 5.16 apresenta os valores obtidos para a carga de início de fendilhação em cada uma das faixas de laje ensaiadas. De uma forma geral, todas as lajes reforçadas permitiram aumentar a carga de início de fendilhação (F_{cr}) e o respetivo deslocamento vertical a meio vão (δ_{cr}), relativamente à laje de referência. Os valores registados foram relativamente próximos, não se verificando nenhuma tendência clara. Esta similaridade já seria expectável a partir da análise da rigidez K_1 (ver Figura 5.3) determinada para cada faixa de laje reforçada, onde valores muito

próximos e superiores à rigidez obtida pela laje de referência tinham sido registados. Para além disso, as extensões experimentadas pelos laminados de CFRP na fase elástica foram muito baixas (ver Figura 5.5), o que faria prever a baixa influência do reforço nesta fase relacionada com a reduzida área homogeneizada em betão que o material de reforço apresentava. Torna-se importante referir que, antes do início da fendilhação, o betão tracionado contribui na sua totalidade na capacidade portante da faixa de laje, sendo este o principal responsável pela rigidez proporcionada. Sendo este um material heterogéneo cujo comportamento está muito dependente das propriedades individuais dos seus constituintes e da sua compatibilidade, as cargas de início de fendilhação podem sempre apresentar alguma dispersão, o que pode justificar a ausência de uma tendência nos valores de F_{cr} obtidos.

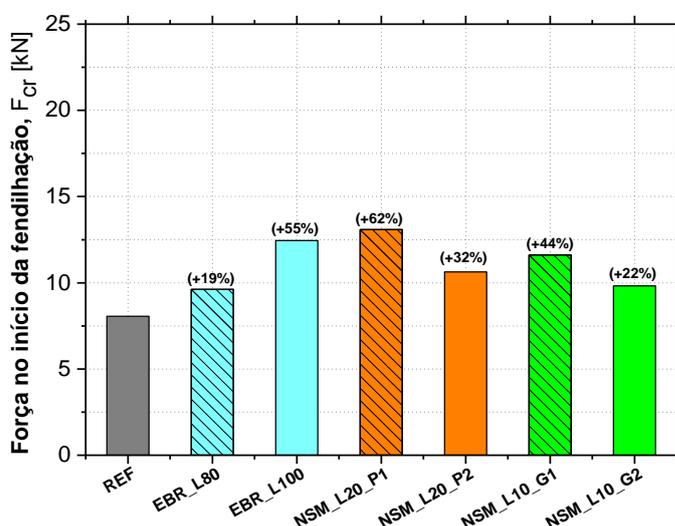


Figura 5.16 - Carga de início de fendilhação.

Nota: os valores entre parêntesis representam o aumento percentual da carga registada no início da fendilhação, relativamente à laje de referência.

Relativamente às faixas de laje onde o sistema EBR CFRP foi aplicado, os valores obtidos para a carga de início do processo de abertura de fendas foram de 9.62 kN e 12.45 kN, respetivamente nas lajes EBR_L80 e EBR_L100. A segunda apresentou uma carga de abertura de fenda superior à primeira devido ao facto da taxa de reforço utilizado ser superior (maior largura da secção transversal do laminado). Assim, incrementos de 19% e 55% foram registados, respetivamente para cada uma das faixas de laje, em relação à laje de referência. Em termos de deslocamento vertical a meio vão, registado no mesmo instante, valores próximos

foram obtidos, com a laje EBR_L100 a apresentar alguma superioridade pelas mesmas razões já referidas.

Nas faixas de laje reforçadas com o sistema NSM CFRP, obtiveram-se valores de 13.09 kN, 10.63 kN, 11.61 kN e 9.82 kN, respetivamente para as cargas de início de fendilhação das lajes NSM_L20_P1, NSM_L20_P2, NSM_L10_G1 e NSM_L10_G2, o que traduz um aumento médio de 40% relativamente à laje de referência. Em termos de deslocamento vertical a meio vão no início do processo de abertura de fenda (δ_{cr}), os valores são reduzidos e muito próximos em cada faixa de laje, com destaque para a laje NSM_L20_P1, que para além de ter registado um maior valor de F_{cr} também apresentou maior valor de δ_{cr} .

5.6.2 Carga de plastificação da armadura longitudinal tracionada

A Figura 5.17 apresenta os valores de carga registados na plastificação da armadura longitudinal tracionada, para cada uma das faixas de laje ensaiadas. A aplicação do reforço nas faixas de laje permitiu aumentar de forma considerável a força de cedência da armadura longitudinal, evidenciando a sua influência no seu comportamento estrutural entre a fase de abertura de fendas e fase de plastificação das armaduras. Tal como foi verificado nas curvas força *versus* extensão do laminado (ver Figura 5.5), a partir do instante que as primeiras fendas no betão tracionado surgem, a extensão experimentada no laminado aumenta significativamente, o que reflete a sua maior solicitação e influência na rigidez K_{II} . A maior rigidez K_{II} apresentada pelas lajes reforçadas com laminados de CFRP, relativamente à laje de referência, justificam o facto de terem sido obtidas cargas de cedência da armadura longitudinal (F_y) muito superiores para deslocamentos verticais a meio vão (δ_y) bastante próximos. Esta influência é ainda maior nas lajes reforçadas com o sistema EBR CFRP devido à maior taxa de reforço longitudinal equivalente utilizada e de forma mais pronunciada na laje EBR_L100, como seria expectável visto que a rotura por destacamento das referidas lajes ocorreu numa fase posterior à cedência da armadura longitudinal.

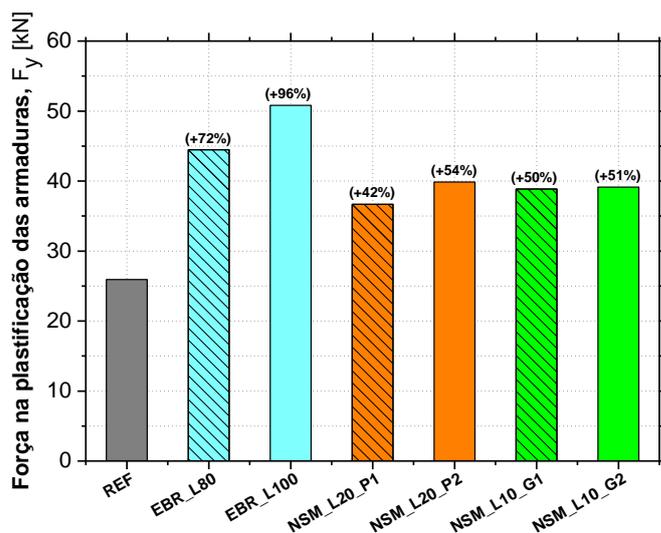


Figura 5.17 - Carga de plastificação da armadura longitudinal.

Nota: os valores entre parêntesis representam o aumento percentual da carga registada na plastificação da armadura longitudinal, relativamente à laje de referência.

Nas lajes onde o reforço CFRP foi aplicado com a técnica EBR, uma carga de plastificação da armadura longitudinal de 44.46 kN e 50.81 kN foram registadas, respetivamente na laje EBR_L80 e EBR_L100. A estes valores correspondem, respetivamente, aumentos de 72% e de 96% relativamente à laje de referência. A influência da largura de laminado fez-se notar de forma significativa na carga de plastificação da armadura longitudinal, verificando-se um aumento de 14% na laje EBR_L100 relativamente à laje EBR_L80.

Relativamente às lajes reforçadas de acordo com a técnica NSM, valores próximos de F_y foram obtidos. Nestas, a mesma quantidade de material de reforço foi adotada, apesar de que diferentes distribuições de laminado ao longo da secção transversal tenham sido utilizadas. Nas lajes reforçadas com dois laminados de CFRP (NSM_L20_P1 e NSM_L20_P2), valores de carga de plastificação da armadura longitudinal de 36.68 kN e de 39.87 kN foram obtidos, respetivamente, aos quais correspondem aumentos de 42% e 54% relativamente à registada na laje de referência. Esta diferença pode estar relacionada com o facto de na laje NSM_L20_P2 os laminados se encontrarem mais próximos e mais centralizados na secção transversal da faixa de laje. Contudo, o aumento parece ser um pouco exagerado visto que a mesma solução de reforço foi utilizada em ambas as lajes. De facto, nas curvas força *versus* deslocamento vertical a meio vão (ver Figura 5.1), a referida laje apresentou uma rigidez K_{II} e K_{III} superiores às

restantes lajes reforçadas com a técnica NSM. Na origem desta discrepância, para além do possível efeito da proximidade dos laminados de CFRP, pode estar uma eventual irregularidade na geometria da laje, ou no posicionamento das armaduras que poderia ter sido alterado no processo de betonagem. Numa tentativa de comprovar estas suposições, a respetiva laje, já deformada, foi alvo de inspeção, onde com recurso a um detetor de armadura (Hilti PS 1000) foram detetadas as armaduras longitudinais, bem como a sua profundidade. Complementarmente, uma banda transversal do betão de recobrimento da faixa de laje foi manualmente escarificada de modo a poder ser analisada a posição da armadura longitudinal. Contudo, em ambas as inspeções efetuadas, não foi possível verificar nenhuma irregularidade no posicionamento das armaduras.

Por sua vez, as lajes reforçadas com quatro laminados de CFRP apresentaram cargas de plastificação das armaduras de 38.86 kN e 39.14 kN, respetivamente para a laje NSM_L10_G1 e NSM_L10_G2, aos quais correspondem incrementos de carga de 50% e 51%, relativamente à obtida na laje de referência. A proximidade entre os valores obtidos reflete a baixa influência que a profundidade da ranhura pré-executada no betão de recobrimento apresentou no valor de F_y .

Considerando a hipótese de alguma irregularidade na laje NSM_L20_P2 ter ocorrido, as lajes reforçadas com quatro laminados de CFRP apresentaram valores de F_y superiores aos obtidos pelas lajes reforçadas com dois laminados, em complementaridade com os respetivos deslocamentos verticais a meio vão (δ_y). Assim, pode ser concluída uma maior eficiência das faixas de laje onde o material de reforço foi mais distribuído ao longo da sua secção transversal.

5.6.3 Carga máxima

A Figura 5.18 apresenta os valores de carga máxima registados em cada uma das faixas de laje. De uma análise imediata, é notável o aumento da capacidade resistente das lajes reforçadas relativamente à laje de referência. Comparando as duas técnicas de reforço utilizadas, a técnica NSM revelou-se muito mais eficiente do que a técnica EBR no reforço à flexão das faixas de laje. Como já foi explicado, a sua maior eficiência está relacionada com os diferentes modos de rotura que ocorreram, visto que quando aplicada a técnica de colagem exterior, a rotura do sistema de reforço ocorreu por destacamento prematuro do laminado de CFRP, sem que tenha

sido esgotada a totalidade da sua capacidade resistente, ao contrário do que aconteceu nas lajes reforçadas com a técnica NSM. Da análise dos resultados obtidos, tornou-se clara a necessidade de maior quantidade de material de reforço quando utilizada a técnica EBR, para atingir uma carga máxima próxima da obtida nas lajes reforçadas com a técnica NSM, cuja taxa de reforço longitudinal utilizada foi inferior. Em termos médios, a rotura por destacamento do laminado de CFRP (quando atingida a F_{\max}), nas lajes reforçadas com a técnica EBR, ocorreu para valores de deslocamento vertical a meio vão (δ_{\max}) inferiores ao registado nas lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP onde a rotura do laminado foi observada, em 57%. A partir desta análise, é evidente a inferioridade em termos de ductilidade apresentada pelas lajes reforçadas com a técnica EBR em comparação às lajes reforçadas com a técnica NSM.

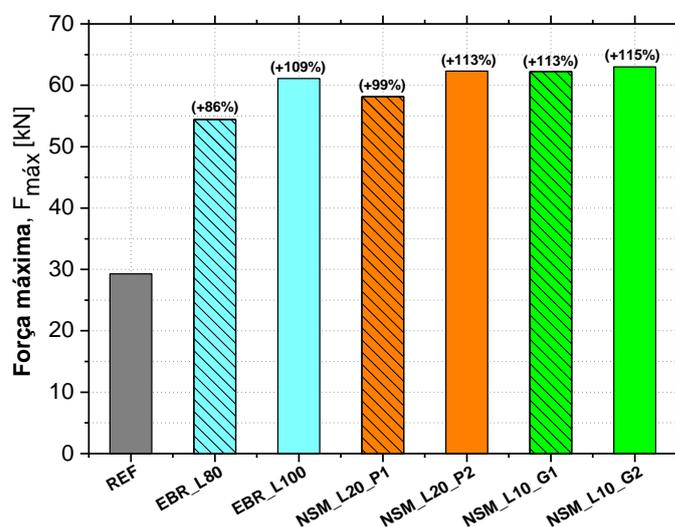


Figura 5.18 - Carga máxima.

Nota: os valores entre parêntesis representam o aumento percentual da carga máxima registada, relativamente à laje de referência.

Nas lajes reforçadas com a técnica EBR, uma carga máxima de 54.44 kN e de 61.10 kN foi obtida nas lajes EBR_L80 e EBR_L100, respetivamente. Aos valores obtidos correspondem aumentos de 86% e 109%, relativamente à carga máxima obtida pela laje de referência. Comparando a carga máxima obtida pelas duas lajes, conclusões podem ser retiradas sobre a influência da largura do laminado de CFRP no seu reforço. A utilização de um laminado de 100 mm na laje EBR_L100 permitiu aumentar a carga máxima em 12% relativamente à laje EBR_L80.

Em relação às lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP, valores mais próximos de carga máxima foram obtidos, em virtude da mesma quantidade de material de reforço adotada em cada uma das lajes. Nas lajes reforçadas com dois laminados de CFRP, cargas máximas de 58.17 kN e de 62.31 kN foram registradas nas lajes NSM_L20_P1 e NSM_L20_P2, respectivamente. A estes valores corresponde um aumento de carga de 99% e 113% relativamente à laje de referência. Comparando os valores obtidos, a laje NSM_L20_P2 permitiu aumentar a carga máxima em 7% relativamente à laje NSM_L20_P1. Entre o possível efeito da maior proximidade entre laminados, alguma discrepância anormal foi verificada nos resultados da laje NSM_L20_P2, tal como foi referido quando, anteriormente, foram comparados os respetivos valores de F_y .

Relativamente às lajes reforçadas com quatro laminados de CFRP, cargas máximas de 62.25 kN e de 63.00 kN foram obtidas nas lajes NSM_L10_G1 e NSM_L10_G2, respectivamente, às quais correspondem incrementos de carga de 113% e 115%, relativamente à laje de referência. Comparando os resultados obtidos, conclusões sobre a influência da profundidade da ranhura pré-executada no betão de recobrimento podem ser retiradas, apesar de não ter sido muito significativa. A laje NSM_L10_G2, cujos laminados foram inseridos e centrados numa ranhura de 15 mm de profundidade, permitiu aumentar sensivelmente a carga máxima atingida relativamente à laje NSM_L10_G1, onde os laminados tinham sido inseridos e centrados numa ranhura de 25 mm de profundidade. Refira-se que a variação da altura útil é de 5 mm, à qual corresponde uma variação de cerca de 4%. Assim, visto que na primeira laje o laminado foi colocado mais próximo da superfície, a capacidade de carga da faixa de laje foi melhorada devido à maior distância do binário entre a força resultante das compressões no betão e a força resultante das trações no laminado, o que proporcionou um maior momento resistente da respetiva secção transversal.

Comparando os valores de F_{max} obtidos nas lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP, é possível verificar que com a solução de quatro laminados de CFRP foram atingidos níveis de carga superiores aos obtidos pelas lajes reforçadas com dois laminados, o que reflete a maior eficiência do reforço quando este se encontra mais distribuído ao longo da secção transversal da faixa de laje.

5.6.4 Extensão máxima no laminado de CFRP

A Figura 5.19 apresenta os valores da extensão máxima experimentada pelo laminado de CFRP em cada uma das faixas de laje, no instante em que a carga máxima (F_{\max}) foi atingida. Na mesma, está representada a extensão última (linha a tracejado) de cada tipo de laminado utilizado, obtida nos ensaios de caracterização apresentados no Capítulo 3. A análise dos valores de $\varepsilon_{f\max}$ permite retirar ilações muito concretas da eficiência do sistema de reforço aplicado. Desde logo, é destacável o facto de as lajes reforçadas com a técnica NSM apresentarem valores $\varepsilon_{f\max}$ muito superiores aos observados nas lajes reforçadas com o sistema EBR CFRP, permitindo uma utilização mais eficiente da capacidade resistente do laminado. Esta diferença deve-se ao modo de rotura das lajes reforçadas com sistema EBR CFRP ter ocorrido por destacamento do laminado (conforme explicado anteriormente), impedindo que este experimentasse extensões mais próximas das que o levariam à rotura por tração tal como se observou nas lajes reforçadas com a técnica NSM.

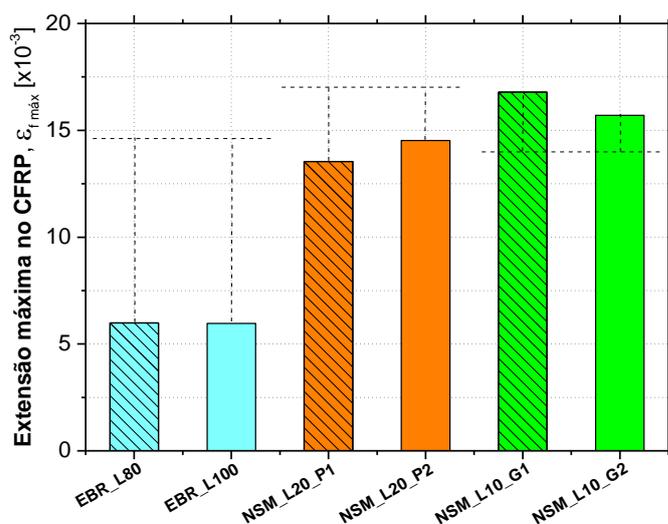


Figura 5.19 - Extensão máxima experimentada pelo laminado de CFRP.

A extensão máxima experimentada pelo laminado de CFRP nas lajes reforçadas com o sistema EBR CFRP foi de 0.6% em ambas as lajes (EBR_L80 e EBR_L100), o que significa que apenas 40% e 43%, da respetiva resistência à tração, foi eficaz. Este desaproveitamento das capacidades resistentes do material compósito quando a técnica EBR é utilizada no reforço à flexão, tem vindo a ser frequentemente verificado pela comunidade científica, onde valores de

extensão máxima muito próximos aos obtidos neste trabalho, têm sido registados (Sena-Cruz *et al.*, 2010; Correia *et al.*, 2015).

Relativamente às lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP, apesar de taxas de reforço longitudinal equivalente praticamente coincidentes terem sido adotadas, os valores de extensão máxima experimentados pelos laminados revelaram ser dependentes da distribuição do material de reforço ao longo da secção transversal da faixa de laje. Mais concretamente, com a utilização de quatro laminados de CFRP, foi possível obter extensões máximas superiores relativamente à solução de reforço que recorria à colocação de dois laminados de CFRP no betão de recobrimento da laje. Este aspeto já seria previsível depois de analisados os padrões de fendilhação apresentados pelas lajes de cada uma das soluções de reforço, onde se verificou uma menor distância média entre fendas primárias de flexão nas lajes NSM_L10_G1 e NSM_L10_G2, nas quais o material de reforço se encontrava mais distribuído.

Nas lajes NSM_L20_P1 e NSM_L20_P2, extensões máximas de 1.35% e 1.45% foram registadas, respetivamente, o que significa que em média 82% da resistência à tração do laminado de secção $20 \times 1.4 \text{ mm}^2$, obtida nos ensaios de caracterização, foi eficaz. Contudo, um valor sensivelmente superior de $\varepsilon_{f\max}$ foi obtido na laje NSM_L20_P2, onde os laminados se encontravam menos distanciados e mais próximos da zona central da secção transversal da faixa de laje. Torna-se importante referir que apesar da extensão registada não ter atingido a que conduz à rotura do laminado, o modo de rotura das faixas de laje NSM_L20_P1 e NSM_L20_P2 foi por rotura dos mesmos. Isto deve-se ao facto de: (i) o laminado durante o processo de carga ser submetido a esforços de flexão e (ii) o extensómetro se localizar a meia altura da secção transversal.

Nas lajes NSM_L10_G1 e NSM_L10_G2, extensões máximas no laminado de 1.68% e 1.57% foram respetivamente obtidas. Estes valores de extensão máxima superaram, em média, 16% a extensão última obtida nos ensaios de caracterização do laminado de secção $10 \times 1.4 \text{ mm}^2$. Situações idênticas já tinham sido observadas por outros autores, tal como no trabalho realizado por Bonaldo *et al.* (2007). Apesar desta constatação, a repetição dos ensaios de caracterização do laminado L10 seria uma tarefa recomendada, de modo a verificar a veracidade dos resultados obtidos na primeira caracterização. Infelizmente, tal tarefa não foi possível de ser efetuada no contexto do presente trabalho. Comparando o valor de $\varepsilon_{f\max}$ obtido em cada uma das lajes

referidas, um valor sensivelmente superior foi registado no laminado da laje NSM_L10_G1, na qual a profundidade da ranhura onde os laminados foram inseridos era superior.

De modo geral, pode ser concluído que nas lajes reforçadas com a técnica NSM que recorreram a quatro laminados de CFRP, uma utilização mais eficiente do material de reforço foi permitida, verificando-se a influência da sua maior distribuição ao longo da secção transversal da faixa de laje. Com esta solução, para além da força máxima (F_{\max}) registada ser superior relativamente às lajes reforçadas com dois laminados, os deslocamentos verticais a meio vão das faixas de laje (δ_{\max}) registados no mesmo instante, foram também superiores, sendo verificado um aumento médio de 16% relativamente ao obtido nas lajes reforçadas com dois laminados de CFRP.

5.6.5 Ductilidade da resposta estrutural das faixas de laje reforçadas

A Figura 5.20 apresenta os valores do parâmetro de ductilidade obtidos para cada uma das faixas de laje reforçadas, expresso pela razão entre δ_{\max}/δ_y , onde δ_{\max} e δ_y representam, respetivamente, os deslocamentos verticais registados a meio vão das faixas de laje, quando atingida a carga F_{\max} e a carga F_y . O mesmo parâmetro tem vindo a ser aplicado por outros autores, onde se obtiveram valores muito semelhantes aos apresentados neste trabalho (Sena-Cruz *et al.*, 2012; Correia *et al.*, 2015; Cruz, 2016). Como seria expectável depois de toda a análise realizada ao longo do presente capítulo, desde os modos de rotura de cada faixa de laje e dos respetivos padrões de fendilhação, passando pela análise das extensões experimentadas por todos os materiais envolvidos e pela comparação dos principais resultados obtidos, as lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP, apresentam uma resposta consideravelmente mais dúctil relativamente às lajes reforçadas com a técnica EBR. A rotura por destacamento precoce do laminado de CFRP quando apenas 40% a 43% da sua capacidade resistente tinha sido eficaz, fazem com que a resposta à flexão das lajes reforçadas com a técnica EBR seja consideravelmente mais frágil do que a obtida nas lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP. Também a partir dos resultados obtidos nas curvas força *versus* deslocamento (ver Figura 5.1) tinha sido verificada uma redução em média de 57% do valor de δ_{\max} obtido nas lajes reforçadas com a técnica EBR relativamente às reforçadas com o sistema NSM CFRP.

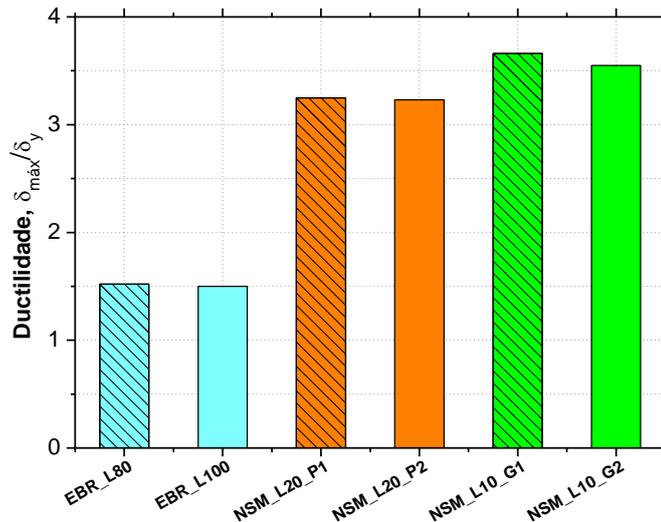


Figura 5.20 - Valores do parâmetro de ductilidade.

Relativamente às lajes reforçadas com a técnica EBR, valores do parâmetro de ductilidade de 1.52 e 1.50 foram obtidos, respetivamente para as lajes EBR_L80 e EBR_L100, o que representa uma redução de em média 56% em relação aos valores do parâmetro de ductilidade obtidos nas lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP. Esta redução é praticamente coincidente com a obtida para o δ_{\max} , anteriormente referida.

Por sua vez, nas lajes reforçadas com dois laminados de CFRP, de acordo com a técnica NSM, o valor do parâmetro de ductilidade obtido foi igual a 3.25 e 3.23, respetivamente para as lajes NSM_L20_P1 e NSM_L20_P2. Comparando os valores, é conclusivo que a distância adotada entre os dois laminados não teve influência na ductilidade da resposta estrutural das faixas de laje.

Em relação às faixas de laje reforçadas com quatro laminados de CFRP, de acordo com a técnica NSM, os valores do parâmetro de ductilidade obtidos foram iguais a 3.66 e 3.55, respetivamente para as lajes NSM_L10_G1 e NSM_L10_G2. Analisando ambos os resultados, pode concluir-se que apesar dos valores obtidos serem muito próximos, a laje NSM_L10_G1 apresentou uma resposta sensivelmente mais dúctil do que a laje NSM_L10_G2, influenciada pela maior profundidade a que os laminados foram inseridos nas ranhuras pré-executadas.

Como seria expectável, o sistema NSM CFRP que recorreu a quatro laminados apresentou um aumento do parâmetro de ductilidade em 11% relativamente às lajes reforçadas com dois

laminados de CFRP, o que traduz uma influência positiva da maior distribuição do material compósito ao longo da secção transversal da faixa de laje.

5.7 Conclusões

Um programa experimental de ensaios de flexão em faixas de laje de betão armado reforçadas com laminados de CFRP, de acordo com as técnicas EBR e NSM, foi estabelecido de modo a avaliar a influência dos seguintes parâmetros no seu comportamento estrutural: (i) eficácia de ambas as técnicas utilizadas no reforço, (ii) largura do laminado de CFRP utilizado no reforço das faixas de laje com a técnica EBR, (iii) várias soluções de reforço com a técnica NSM, onde se fez variar o nível de distribuição do material compósito ao longo da secção transversal das faixas de laje, a distância transversal entre laminados de CFRP e a profundidade adotada para as ranhuras pré-executadas no betão de recobrimento. Em termos gerais, as seguintes conclusões podem ser retiradas:

- A aplicação do reforço permitiu melhorar o comportamento estrutural à flexão das faixas de laje, tanto em serviço como na capacidade última, independentemente da técnica utilizada;
- Nas lajes reforçadas com a técnica EBR, a rotura ocorreu por destacamento do laminado de CFRP, permitindo que apenas um valor médio de 42% da sua capacidade resistente fosse eficaz;
- Nas lajes reforçadas com a técnica NSM, ocorreu a rotura dos laminados de CFRP na zona de flexão pura das faixas de laje, assim que a sua capacidade resistente à tração foi esgotada;
- O padrão de fendilhação apresentado pelas lajes reforçadas com sistema EBR CFRP aproximou-se do observado na laje de referência em termos de quantidade de fendas de flexão e de distância média entre fendas. Contudo uma maior extensão da banda de fendilhação foi observada;
- Em termos de padrão de fendilhação, o reforço com o sistema NSM CFRP permitiu aumentar a quantidade de fendas de flexão, diminuir a distância média entre fendas e aumentar a extensão da banda de fendilhação, em relação à laje de referência. Com a solução de reforço que recorria à utilização de quatro laminados de CFRP, o aumento da quantidade de fendas de flexão e a redução da distância média entre fendas foi

consideravelmente mais pronunciado. Para além da abertura de fendas de flexão primárias, foram observadas fendas secundárias em forma de espinha de peixe (*herringbone*) devido ao deslizamento do laminado de CFRP em relação ao betão;

- No comportamento das lajes reforçadas com a técnica EBR, verificou-se uma influência considerável da largura transversal do laminado utilizado. Ao passar de um laminado com largura de 80 mm para 100 mm, verificou-se um aumento da carga de fendilhação (F_{cr}), um aumento da carga de plastificação da armadura longitudinal (F_y) e um aumento da carga máxima (F_{max}). Em termos de ductilidade, não foi verificada a influência da largura do laminado;
- Nas lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP, a maior distribuição do material de reforço pela secção transversal proporcionada pela utilização de quatro laminados de CFRP em vez de apenas dois com o dobro da área de secção transversal, permitiu aumentar a carga de plastificação da armadura (F_y) e aumentar a carga máxima (F_{max}). Não obstante, esta solução possibilitou que os laminados de CFRP experimentassem extensões máximas (ϵ_{fmax}) superiores o que significa uma utilização mais eficiente da sua capacidade resistente, tornando a resposta estrutural mais dúctil, tal como foi verificado pelos valores superiores que o parâmetro de ductilidade (δ_{max}/δ_y) apresentou;
- Pela comparação da resposta estrutural das lajes NSM_L20_P1 e NSM_L20_P2, foi verificada a influência da distância transversal adotada entre laminados. Diminuindo a distância entre estes na laje NSM_L20_P2, maiores valores de carga de plastificação da armadura (F_y), de carga máxima (F_{max}) e de extensão máxima experimentada pelo laminado (ϵ_{fmax}), foram obtidos;
- Pela comparação da resposta estrutural das lajes NSM_L10_G1 e NSM_L10_G2, foi verificada a influência da profundidade adotada para as ranhuras pré-executadas no betão de recobrimento. Encontrando-se os laminados centrados em profundidade nas respetivas ranhuras, a diminuição da sua profundidade permitiu aumentar a carga de plastificação das armaduras (F_y) e a carga máxima (F_{max}). Contudo, uma menor extensão máxima experimentada pelo laminado (ϵ_{fmax}) foi observada;
- Com exceção da laje EBR_L80, todas as restantes lajes reforçadas com laminados de CFRP permitiram duplicar a capacidade de carga da laje de referência.

CAPÍTULO 6

SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Os ensaios experimentais realizados no âmbito da presente dissertação foram simulados numericamente, com recurso ao método dos elementos finitos (MEF), com o objetivo de não só prever o resultado obtido experimentalmente, mas também permitir uma melhor interpretação do comportamento estrutural de provetes de betão reforçados com sistemas FRP. Além disso, a sua realização permitiu avaliar a capacidade que atuais ferramentas MEF possuem na simulação do comportamento deste tipo de elementos estruturais. Finalmente, a calibração destes modelos permitirá a realização de estudos paramétricos com vista à análise de diferentes parâmetros que influenciam a resposta, permitindo a eventual dispensa de ensaios experimentais, dispendiosos e morosos. Assim, de acordo com o programa experimental levado a cabo (ver Capítulo 3), os seguintes ensaios foram simulados: (i) ensaios de arranque direto em provetes de betão reforçados com o sistema EBR CFRP e (ii) ensaios de flexão em faixas de laje de betão armado reforçadas com o sistema NSM CFRP e EBR CFRP.

A totalidade das simulações numéricas realizadas foi desenvolvida no *software* de elementos finitos *Femix 4.0*. Este software tem por base o método dos deslocamentos possuindo uma extensa biblioteca com diversos tipos de elementos finitos. As principais potencialidades do software, os vários tipos de análise estrutural que este permite realizar, as diversas técnicas avançadas disponíveis no cálculo numérico bem como os vários tipos de elementos finitos inseridos no seu código computacional, foram apresentados em detalhe no Capítulo 2.

No presente capítulo, as simulações numéricas realizadas serão descritas em complementaridade com a análise dos principais resultados obtidos. De forma a avaliar a sua precisão, os resultados numéricos serão também comparados com os resultados obtidos experimentalmente. Numa primeira fase serão descritos e analisados os modelos numéricos que simulam os ensaios de arranque direto seguindo-se as simulações dos ensaios de flexão em faixas de laje.

6.1 Simulação dos ensaios de arranque direto

Os ensaios de arranque direto desenvolvidos no programa experimental do presente trabalho, foram simulados numericamente como um problema em estado plano de tensão. A Figura 6.1 apresenta a malha de elementos finitos, a geometria e as condições de suporte utilizadas no modelo numérico de simulação do ensaio, para os provetes com comprimento de ancoragem (L_b) de 150, 200 e 250 mm. O provete de betão e o suporte metálico S3 (ver Figura 3.1 (b)) foram modelados com recurso a elementos finitos *Serendipity* de 8 nós em estado plano de tensão com um esquema de integração de *Gauss-Legendre* 2×2 . Por sua vez, o laminado de CFRP foi modelado através de elementos de cabo 2D quadráticos de 3 nós com dois pontos de integração de *Gauss-Legendre* enquanto os varões metálicos em aço foram simulados através de elementos de barra lineares 2D. Nas simulações desenvolvidas, o adesivo responsável pela ligação entre o laminado de CFRP e o substrato de betão não foi explicitamente modelado, embora o seu comportamento tenha sido simulado em conjunto com o comportamento da interface CFRP/betão. Para isso, recorreu-se a elementos finitos de interface quadráticos constituídos por 6 nós com dois pontos de integração *Gauss-Lobatto*. Nas restantes superfícies de contacto entre diferentes materiais, mais concretamente entre o aço do suporte S3 e o provete de betão, foi assumida a existência de aderência perfeita.

No que respeita às condições de apoio, admitiu-se que a base metálica de suporte ao provete (suporte S1 de acordo com a Figura 3.1 (b)) funciona como apoio unilateral. Esta hipótese deve-se ao facto de esta ser bastante rígida e se encontrar ligada a um pórtico metálico de elevada rigidez, tal como foi explicitado no modelo numérico de previsão do comportamento de ensaio descrito no Capítulo 3. Assim, esta foi simulada através de um conjunto de molas de comportamento não linear aplicadas em cada um dos elementos finitos que simulam o betão ao longo da face de contacto com a base metálica. Atribuindo às propriedades mecânicas das molas uma rigidez inicial e uma resistência à compressão muito elevadas, o provete de betão fica impedido de experimentar deslocamentos verticais descendentes e possibilitado de levantar durante o processo de carregamento. O suporte S2 (ver Figura 3.1 (b)), colocado na secção frontal do provete (extremidade carregada), foi simulado através de um conjunto de apoios simples aplicados num desenvolvimento vertical de 50 mm, impedindo que este experimente translações horizontais (tanto quanto possível) quando o laminado for tracionado no decorrer

do ensaio. A ligação do varão roscado com o suporte S1 foi simulada com um apoio de encastramento, impedindo que este experimente translações nas duas direções e a rotação.

Nas simulações numéricas realizadas, a carga foi aplicada através de um deslocamento prescrito horizontal no nó de extremidade (ponto de carga) do elemento finito extremo do laminado de CFRP.

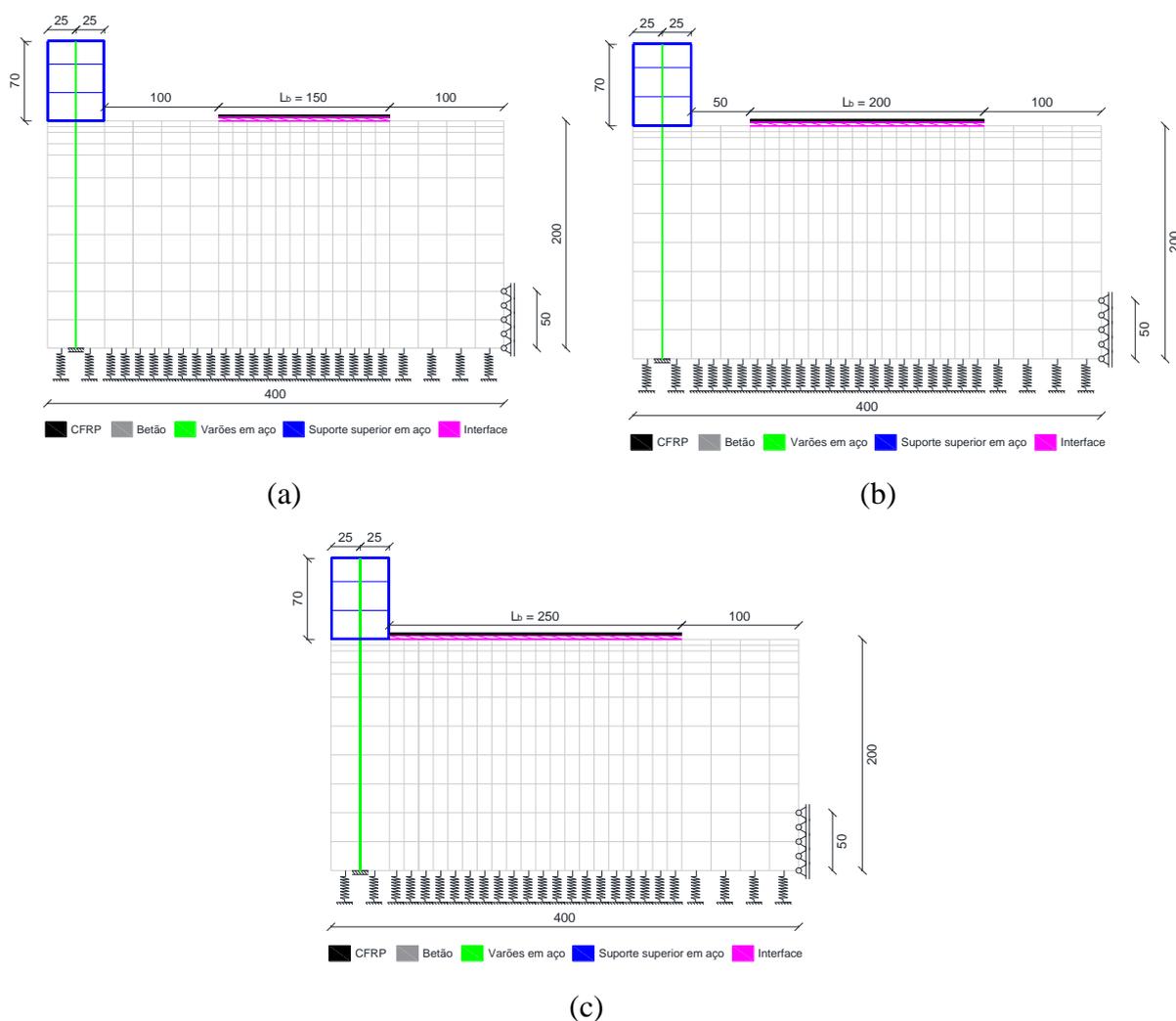


Figura 6.1 - Malha de elementos finitos, geometria e condições de apoio dos modelos numéricos de simulação dos ensaios de arranque direto para os provetes com diferente comprimento de ancoragem adotado: (a) $L_b = 150$ mm; (b) $L_b = 200$ mm; (c) $L_b = 250$ mm. Nota: todas as dimensões estão em milímetros.

6.1.1 Propriedades do betão, do aço e do laminado de CFRP

Tal como foi descrito no Capítulo 4, onde os resultados experimentais obtidos nos ensaios de arranque direto foram apresentados e discutidos, o mecanismo de rotura observado em todos os provetes reforçados com o sistema EBR CFRP, independentemente da metodologia de preparação da superfície utilizada e do comprimento de ancoragem adotado, foi o destacamento do sistema de reforço. Assim, em todas as simulações numéricas realizadas, toda a não linearidade do sistema foi localizada ao nível da interface CFRP/betão, considerando-se que o betão e o aço apresentavam um comportamento linear elástico em complementaridade com o real comportamento linear elástico do laminado de CFRP.

Considerando os resultados dos ensaios de caracterização mecânica do betão relativo aos provetes prismáticos e do laminado de CFRP utilizado no seu reforço (L50) (ver Capítulo 3), as propriedades mecânicas atribuídas a cada um dos materiais envolvidos na simulação numérica dos ensaios de arranque direto foram as apresentadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Propriedades adotadas para os diferentes materiais na simulação numérica dos ensaios de arranque direto.

Material	Módulo de Elasticidade [GPa]	Coefficiente de <i>Poisson</i>
Betão	30.8	0.2
Aço	200	0.3
Laminado de CFRP	176.4	0.2

6.1.2 Modelo constitutivo de interface

Relativamente à ligação entre o laminado de CFRP e a superfície de betão, duas principais estratégias têm sido utilizadas pela comunidade científica na simulação numérica de ensaios de aderência, com base no MEF. A primeira consiste na utilização de expressões analíticas como modelos constitutivos dos elementos da interface e tem vindo a demonstrar ser bastante eficaz na reprodução do comportamento global do sistema. A segunda estratégia diz respeito a uma abordagem baseada em modelos constitutivos de interface descontínuos de espessura igual a zero. De acordo com Coelho *et al.* (2016), a principal diferença que existe, em termos práticos,

na utilização das duas referidas abordagens, reside no facto de a primeira ser geralmente baseada numa expressão analítica assumida *a priori* para a lei de interface (tensão de corte *versus* deslizamento), enquanto que a segunda abordagem é completamente concebida dentro do quadro geral de teorias constitutivas, como o caso da fratura e da plasticidade, onde a lei de interface não é conhecida *a priori*.

O modelo constitutivo de interface utilizado na simulação do comportamento de aderência entre a superfície de betão e o laminado de CFRP nos modelos numéricos dos ensaios de arranque direto realizados, foi o proposto por Coelho *et al.* (2016). Este modelo constitutivo é constituído por três módulos separados que permitem realizar análises 2D e 3D considerando apenas o modo II de fratura (associado ao deslizamento do sistema de reforço na direção do carregamento) ou simultaneamente o modo II e I de fratura (este último associado ao movimento do sistema de reforço na direção normal à direção do carregamento). O primeiro módulo (CM II) é usado em análises 2D e 3D onde apenas o modo II de fratura é considerado. Consequentemente, na direção do carregamento é considerado um comportamento elasto-plástico não linear enquanto nas restantes direções é assumido um comportamento elástico linear. Por sua vez, o segundo módulo (CM I/II 2D), foi desenvolvido para análises 2D onde ambos os modos de fratura I e II, são considerados. Relativamente ao terceiro módulo (CM I/II 3D), este foi desenvolvido para análises 3D onde também é considerado um comportamento elasto-plástico em todas as direções locais.

Todos os módulos que constituem o modelo constitutivo de interface abordado foram testados por Coelho *et al.* (2016) onde se simularam ensaios de arranque direto, nesse caso quando aplicada a técnica NSM. De acordo com os autores, os resultados em termos de comportamento global força de arranque *versus* deslizamento na extremidade carregada, não foram muito influenciados pela não consideração do modo I de fratura, apesar de que quando utilizado o segundo ou terceiro módulo do modelo constitutivo, a fase de pós-pico obtida experimentalmente tenha sido melhor reproduzida numericamente. Contudo, a primeira fase aproximadamente linear da resposta até à fase onde se começa a notar alguma degradação da rigidez da ligação, foi perfeitamente simulada tanto com a utilização do primeiro módulo do modelo constitutivo (não considerando o modo I de fratura), como com a utilização dos restantes módulos que consideram tanto o modo I como o modo II de fratura.

Em ensaios de arranque direto onde o sistema de reforço é instalado de acordo com a técnica EBR, tal como os realizados na presente dissertação e cujos resultados foram apresentados e discutidos no Capítulo 4, a resposta global em termos de força de arranque *versus* deslizamento na extremidade carregada não apresenta fase de pós pico devido à ausência do efeito de confinamento e dos mecanismos de fricção que permitiriam que o sistema continuasse a distribuir tensões, tal como acontece quando utilizada a técnica NSM. Adicionalmente, no âmbito da componente experimental não foi avaliada a componente de modo I. Por estas razões, na simulação dos ensaios de arranque direto realizados, apenas se considerou o modo II de fratura utilizando o primeiro módulo (CM II) do modelo constitutivo proposto por Coelho *et al.* (2016). Assim, o efeito das tensões normais na interface e de deslocamentos para fora do plano foi negligenciado.

A formulação analítica relativa ao modelo constitutivo de interface utilizado encontra-se descrita em detalhe em Coelho *et al.* (2016). Visto ser a primeira vez que esta formulação é utilizada na simulação do comportamento de aderência quando aplicado o sistema de reforço EBR CFRP, os parâmetros dos quais o fenómeno depende tiveram de ser ajustados em cada um dos ensaios realizados, dependendo do tratamento de superfície utilizado e do comprimento de ancoragem adotado, de modo a aproximar a resposta global obtida por via numérica da resposta obtida experimentalmente.

Os parâmetros que constituem o primeiro módulo do modelo constitutivo de interface utilizado (CM II) e que foram ajustados foram a coesão (resistência ao corte) (c), o parâmetro de amolecimento da coesão (α_c), a energia de fratura em modo II (G_f^{II}) e a rigidez tangencial elástica na direção do carregamento (k_1^e). O valor adotado para os diferentes parâmetros em cada uma das simulações dos ensaios de arranque direto encontra-se apresentado na Tabela 6.2. Assumindo que a rigidez normal dos elementos de interface tem um efeito marginal no comportamento da ligação, um valor constante de 10^6 MPa/mm foi atribuído ao parâmetro k_2^e .

Tabela 6.2 - Parâmetros requeridos pelo modelo constitutivo de interface.

Provete	c [MPa]	α_c	G_f^{II} [N/mm]	k_1^e [MPa/mm]	k_2^e [MPa/mm]
GR_Lb150	3.15	1.4	0.68	350	1×10^6
GR_Lb200	3.03	1.4	0.65	400	1×10^6
GR_Lb250	2.80	1.4	0.75	400	1×10^6
SB_Lb150	4.10	1.4	0.7	400	1×10^6
SB_Lb200	3.18	1.4	1.26	400	1×10^6
SB_Lb250	3.10	1.4	1.35	400	1×10^6

6.1.3 Força de arranque *versus* deslizamento na extremidade carregada

A Figura 6.2 apresenta os resultados obtidos nas simulações numéricas realizadas em termos de relação entre força de arranque e deslizamento na extremidade carregada. O valor de força apresentado foi o obtido no nó de extremidade do elemento finito do laminado de CFRP onde o deslocamento prescrito foi imposto (extremidade carregada) enquanto que o deslizamento foi retirado do ponto de integração mais próximo da extremidade carregada do elemento finito de interface, permitindo obter o deslocamento relativo entre o laminado e o provete de betão. Na mesma figura é também possível comparar o resultado obtido numericamente com o resultado obtido experimentalmente, visto que para cada série de ensaios onde os provetes foram ensaiados nas mesmas condições (mesmo tratamento de superfície utilizado e mesmo comprimento de ancoragem), é apresentada a cinza a envolvente dos resultados experimentais.

Observando as curvas apresentadas na Figura 6.2, é possível verificar que as simulações numéricas dos ensaios de arranque direto conseguiram captar com relativo sucesso as duas principais fases da resposta obtida experimentalmente: (i) a fase inicial onde o comportamento é aproximadamente linear e é essencialmente governado pela adesão química entre os materiais envolvidos no sistema de reforço (betão, adesivo e laminado de CFRP) e que ocorre desde o início do ensaio até um nível de carga entre 70% a 80% da carga máxima monitorizada e (ii) a segunda fase correspondente à degradação da rigidez a partir do instante em que o processo de destacamento do laminado de CFRP se inicia, assim que a resistência ao corte no início do comprimento de ancoragem é atingida.

Em termos de força de arranque máxima, a simulação numérica também proporcionou uma previsão muito satisfatória, obtendo-se valores entre a força de arranque mínima e máxima registada em cada série de ensaios experimentais. A Tabela 6.3 inclui a comparação dos valores de força de arranque máxima obtida nas simulações numéricas ($F_{l,max,num}$) com os valores médios de força de arranque máxima obtida em cada uma das séries de ensaios experimentais ($F_{l,max,exp}$). A precisão do modelo pode ser avaliada pelo valor do parâmetro ERP (Erro Relativo Percentual).

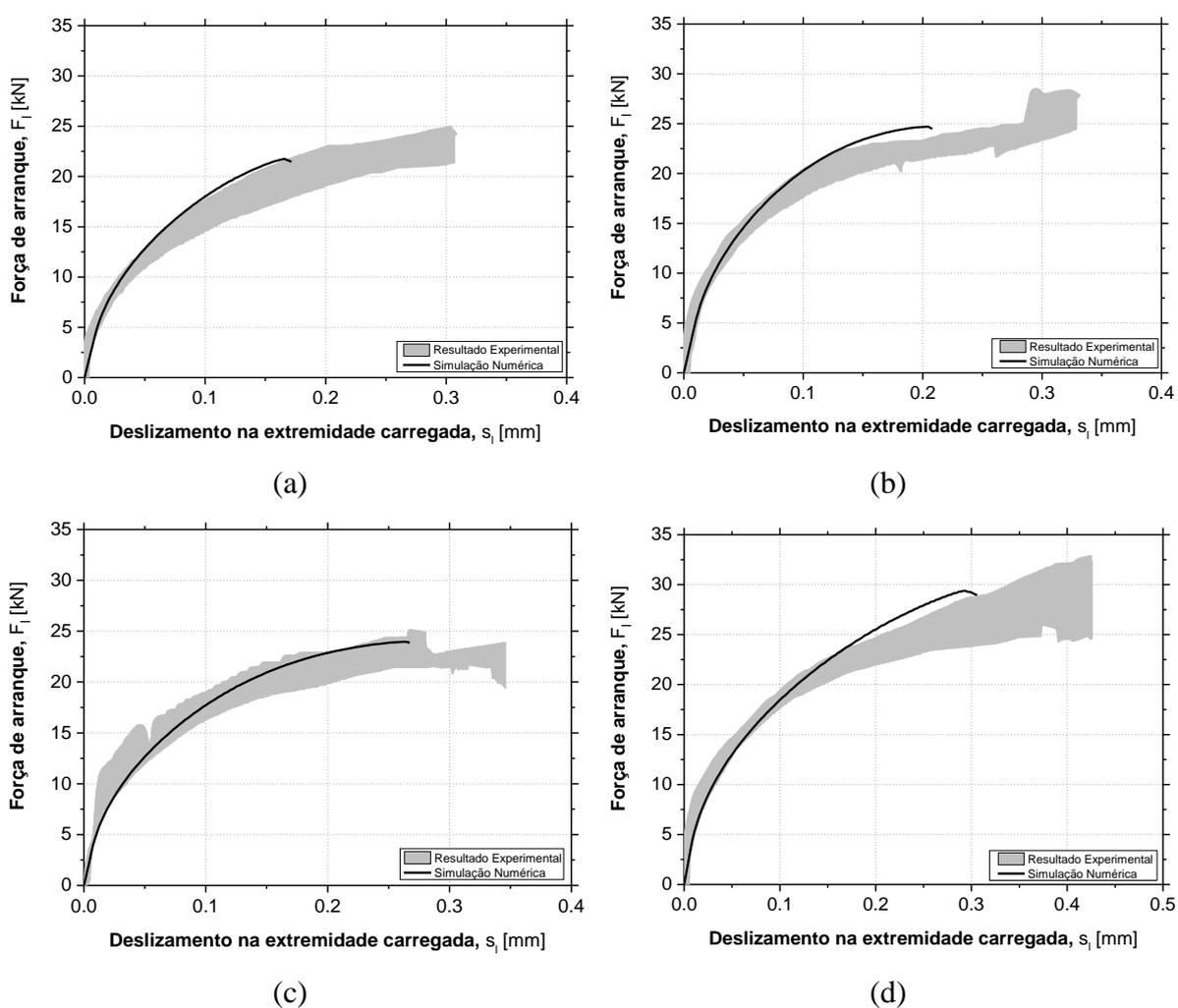


Figura 6.2 - Curvas força de arranque *versus* deslizamento na extremidade carregada (comparação do resultado experimental e numérico): (a) GR_Lb150; (b) SB_Lb150; (c) GR_Lb200; (d) SB_Lb200; (e) GR_Lb250; (f) SB_Lb250.

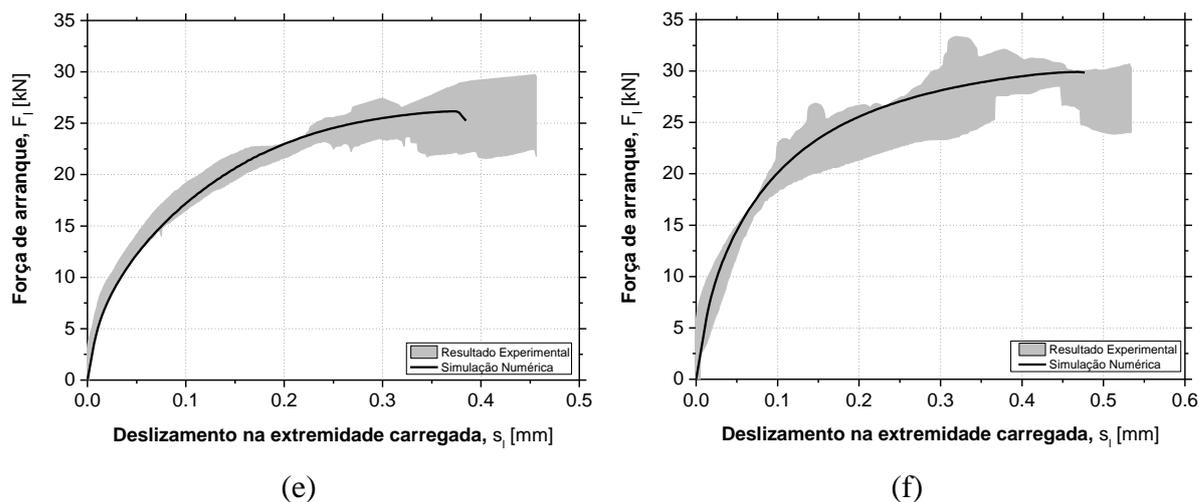


Figura 6.2 (cont.) - Curvas força de arranque *versus* deslizamento na extremidade carregada (comparação do resultado experimental e numérico): (a) GR_Lb150; (b) SB_Lb150; (c) GR_Lb200; (d) SB_Lb200; (e) GR_Lb250; (f) SB_Lb250.

Tabela 6.3 - Comparação entre o valor de força de arranque máxima obtida nas simulações numéricas com o valor médio de força de arranque máxima obtida em cada série de ensaios experimentais.

Provete	$F_{l,max,exp}$ [kN]	$F_{l,max,num}$ [kN]	ERP [%]
GR_Lb150	23.8	21.8	8.4
GR_Lb200	23.8	24.0	0.8
GR_Lb250	26.8	26.2	2.2
SB_Lb150	27.2	24.7	9.2
SB_Lb200	30.2	29.4	2.6
SB_Lb250	31.3	29.9	4.5

6.1.4 Distribuição das extensões axiais ao longo do comprimento de ancoragem

A Figura 6.3 apresenta a distribuição das extensões axiais no laminado de CFRP ao longo do comprimento de ancoragem, para diferentes níveis de carregamento, obtida na simulação dos ensaios de arranque direto das séries GR_Lb250 e SB_Lb250. Na mesma figura são comparados os resultados numéricos com a monitorização das extensões realizada experimentalmente através dos extensómetros colocados na superfície do laminado de CFRP. A posição adotada para a instalação dos extensómetros ao longo da superfície do laminado foi apresentada no Capítulo 3 e os resultados da sua monitorização foram discutidos no Capítulo 4. Nas simulações numéricas, o valor das extensões foi retirado do ponto de integração mais

próximo da extremidade carregada de cada um dos elementos finitos que constitui o laminado de CFRP.

Analisando os resultados obtidos e apresentados na Figura 6.3, é verificado que a simulação numérica foi capaz de reproduzir as principais fases do comportamento da ligação entre o laminado de CFRP e a superfície de betão, mais concretamente a fase precedente ao destacamento do reforço e a fase em que este se inicia. Para níveis de carga inferiores ao que se traduz no início do processo de destacamento, a distribuição de extensões axiais obtida numericamente é praticamente coincidente com obtida no ensaio experimental, tanto na série GR_Lb_250 (ver Figura 6.3 (a)) como na série SB_Lb250 (ver Figura 6.3 (b)), traduzindo-se numa queda exponencial desde a extremidade carregada até à extremidade livre. A partir do momento em que o processo de destacamento se inicia, o comportamento apresentado pela distribuição das extensões axiais obtida nas simulações afasta-se do obtido experimentalmente. Em ambas as séries de ensaio apresentadas, o comprimento de ligação envolvido na transferência de tensões entre o laminado e o betão, parece ser maior nos resultados obtidos das simulações numéricas relativamente ao experimental, o que de certa forma pode explicar o facto de na resposta em termos de força de arranque *versus* deslizamento na extremidade carregada, o destacamento completo do sistema de reforço tenha ocorrido para valores de deslizamento inferiores no caso das simulações numéricas (ver Figura 6.2). Tal como foi referido no Capítulo 3, o facto de um número reduzidos de extensómetros terem sido utilizados nos ensaios experimentais, impossibilitou que uma distribuição aproximadamente contínua do perfil de extensões tenha sido obtida, o que também prejudica a análise comparativa entre os resultados numéricos e os experimentais, apresentada na Figura 6.3.

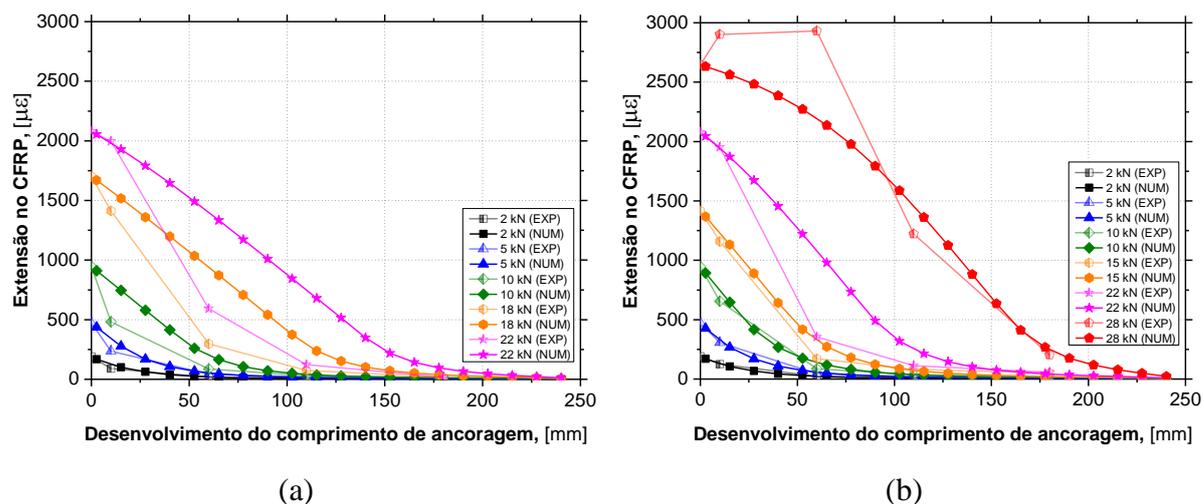


Figura 6.3 - Distribuição das extensões axiais ao longo do laminado de CFRP, em diferentes níveis de carregamento (comparação do resultado experimental e numérico): (a) GR_Lb250; (b) SB_Lb250.

6.2 Simulação dos ensaios de flexão em faixas de laje

Nesta secção é apresentada a simulação numérica dos ensaios de flexão em faixas de laje desenvolvidos no âmbito da investigação experimental da presente dissertação. A geometria, a configuração de ensaio e os vários parâmetros analisados foram apresentados no Capítulo 3. Os resultados obtidos experimentalmente e a influência das variáveis em estudo no comportamento à flexão das faixas de laje, foram apresentados e discutidos no Capítulo 5.

Na Figura 6.4 é apresentada a geometria, a malha de elementos finitos, a configuração de carregamento e as condições de apoio adotadas nas simulações numéricas de cada uma das faixas de laje. Foram desenvolvidas quatro diferentes malhas de elementos finitos para as diferentes geometrias de reforço adotadas no programa experimental, mais concretamente (i) para a laje REF (malha da Figura 6.4 (a)), (ii) para as lajes NSM_L20_P1 e NSM_L10_G1 onde os laminados de CFRP, apesar de possuírem diferentes secções transversais, foram colocados à mesma profundidade (malha da Figura 6.4 (b)), (iii) para a laje NSM_L10_G2 (malha da Figura 6.4 (c)) e (iv) para as lajes EBR_L80 e EBR_L100 (malha da Figura 6.4 (d)).

Todas as faixas de laje foram simuladas como um problema em estado plano de tensão. De modo a simular o betão recorreu-se a elementos finitos *Serendipity* de 8 nós em estado plano de tensão com um esquema de integração de *Gauss-Legendre* 2×2 . A armadura longitudinal e transversal, bem como os laminados de CFRP das faixas de laje reforçadas foram simulados

através de elementos de cabo 2D quadráticos de 3 nós com dois pontos de integração de *Gauss-Legendre*.

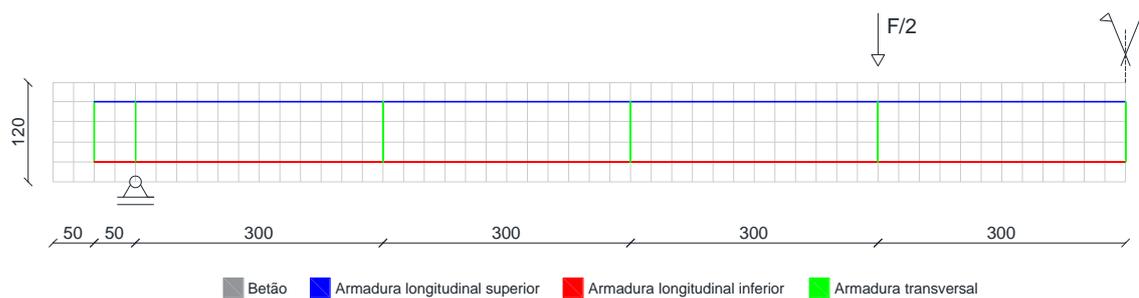
Em termos de comportamento de interface, foi admitida a existência de aderência perfeita entre os varões de aço e o betão, em todas as simulações numéricas. Relativamente à simulação do comportamento de aderência entre o laminado de CFRP e o betão, diferentes considerações foram estabelecidas dependendo da técnica de reforço utilizada nas faixas de laje.

Nas faixas de laje onde a técnica NSM foi aplicada (ver Figura 6.4 (b) e (c)), foi assumida aderência perfeita entre o material de reforço e o betão circundante. A influência desta consideração na simulação numérica de elementos estruturais reforçados de acordo com esta técnica de reforço já tem vindo a ser estudada por investigadores científicos. Sena-Cruz (2005) simulou numericamente, no *Femix 4.0*, vigas de betão armado reforçadas com sistema NSM CFRP e verificou que assumindo aderência perfeita entre o laminado de CFRP e o betão, o comportamento global à flexão das vigas obtido experimentalmente foi reproduzido de forma precisa. Além disso, o autor concluiu que a consideração do efeito do deslizamento entre o CFRP e o betão na simulação das vigas reforçadas com a técnica NSM, teve uma contribuição marginal na sua resposta global.

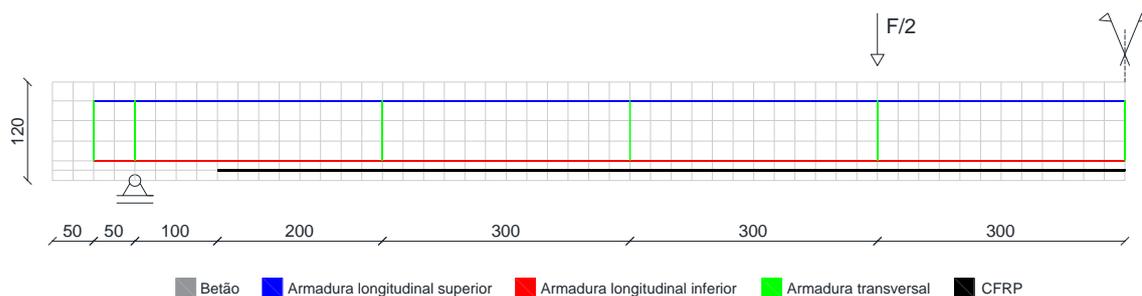
Relativamente à simulação das faixas de laje reforçadas com o sistema EBR CFRP, visto que o modo de rotura observado nos ensaios experimentais foi o destacamento do sistema de reforço, o comportamento de aderência entre o laminado de CFRP e a superfície do betão da faixa de laje foi simulado (ver malha de elementos finitos da Figura 6.4 (d)). Para isso recorreu-se a elementos finitos de interface quadráticos constituídos por 6 nós com dois pontos de integração *Gauss-Lobatto*.

Em todas as simulações numéricas, a carga foi aplicada através de um deslocamento prescrito no ponto de carga.

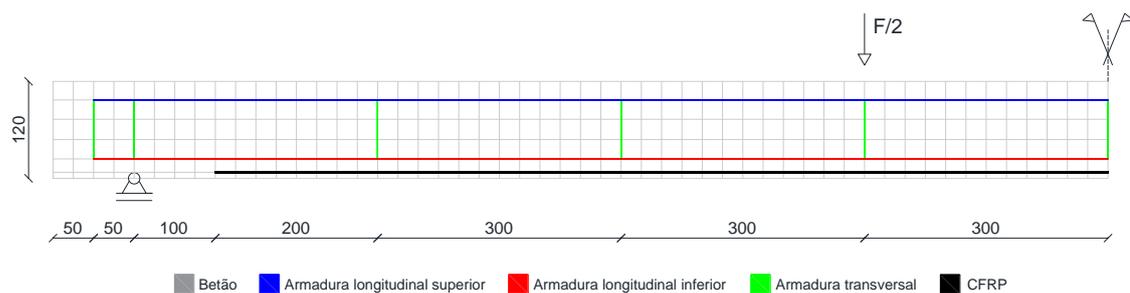
Simulações numéricas



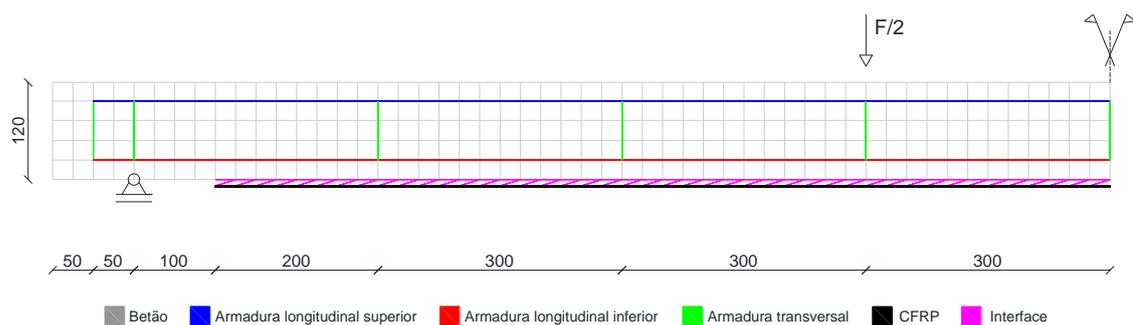
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6.4 - Malha de elementos finitos, geometria, configuração de carregamento e condições de apoio dos modelos numéricos de simulação dos ensaios de flexão das diferentes faixas de laje: (a) REF; (b) NSM_L20_P1 e NSM_L10_G1; (c) NSM_L10_G2; (d) EBR_L80 e EBR_L100. Nota: todas as dimensões estão em milímetros.

6.2.1 Propriedades da armadura longitudinal, transversal e dos laminados de CFRP

As propriedades da armadura longitudinal e transversal utilizada no reforço das faixas de laje, foram determinadas através de ensaios de tração uniaxial. A metodologia de ensaio adotada e os resultados obtidos após a sua caracterização foram apresentados no Capítulo 3.

De modo a simular numericamente o comportamento dos varões de aço, as curvas tensão *versus* extensão obtidas nos ensaios de caracterização (ver Figura 3.14) foram idealizadas por um modelo constitutivo uniaxial cuja curva tensão (σ_s) *versus* extensão (ε_s) é apresentada na Figura 6.5. A referida curva é constituída por quatro ramos (ver equação (6.1)) e para os definir são requeridos três pontos ($PT1 = (\varepsilon_{sy}, \sigma_{sy})$; $PT2 = (\varepsilon_{sh}, \sigma_{sh})$; $PT3 = (\varepsilon_{su}, \sigma_{su})$) e um parâmetro p , que normalmente varia entre 1 e 4. Contudo, e de forma simplificada, nas simulações numéricas realizadas, o comportamento dos varões de aço foi considerado bilinear, assumindo que o $PT2$ é coincidente com o $PT3$ e as respectivas coordenadas dadas pelos valores de ε_{su} e σ_{su} obtidos nos ensaios de caracterização mecânica.

Relativamente às propriedades dos laminados de CFRP utilizados no reforço à flexão das faixas de laje, estas foram determinadas através de ensaios de tração uniaxiais. Os ensaios de caracterização dos laminados e os respetivos resultados, foram também descritos e apresentados em detalhe no Capítulo 3.

Com o objetivo de simular numericamente o comportamento dos laminados de CFRP, o mesmo modelo constitutivo apresentado na Figura 6.5 foi utilizado. Contudo, visto que estes apresentam um comportamento linear elástico até à rotura (ver exemplo da Figura 3.15), admitiu-se que o $PT1$, o $PT2$ e o $PT3$, seriam pontos coincidentes e as coordenadas dadas pelos valores de extensão última e tensão máxima de tração obtida nos ensaios de caracterização dos laminados.

Na Tabela 6.4 são apresentadas as propriedades dos materiais de reforço (varões de aço e laminados de CFRP) utilizadas na simulação das faixas de laje reforçadas à flexão, de acordo com o modelo constitutivo utilizado e apresentado na Figura 6.5.

$$\sigma(s) = \begin{cases} E_s \varepsilon_s & se \quad \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \\ E_{sy}(\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}) + \sigma_{sh} & se \quad \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sh} \\ \sigma_{su} + (\sigma_{sh} - \sigma_{su}) \left(\frac{\varepsilon_{su} - \varepsilon_s}{\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh}} \right)^p & se \quad \varepsilon_{sh} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su} \\ 0 & se \quad \varepsilon_s > \varepsilon_{su} \end{cases} \quad (6.1)$$

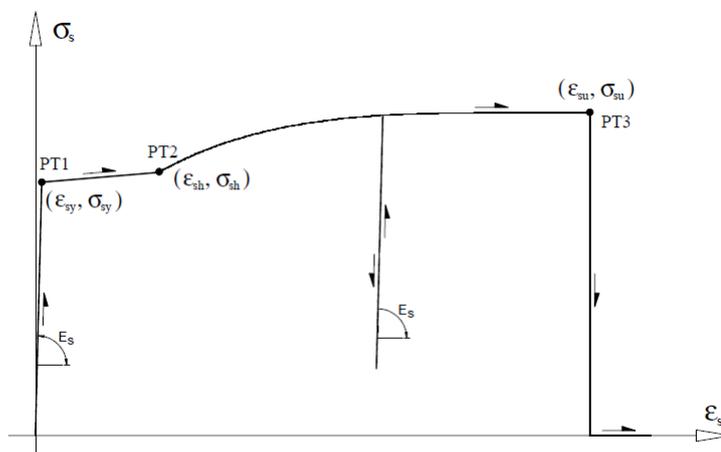


Figura 6.5 – Modelo constitutivo uniaxial das armaduras de reforço (Sena-Cruz, 2005).

Tabela 6.4 - Propriedades adotadas para os materiais de reforço (varões de aço e laminados de CFRP) na simulação das faixas de laje.

Reforço	$(\varepsilon_{sy} ; \sigma_{sy})$	$(\varepsilon_{sh} ; \sigma_{sh})$	$(\varepsilon_{su} ; \sigma_{su})$	p
Ø6	$(2.47 \times 10^{-3} ; 543.9)$	$(111.67 \times 10^{-3} ; 670)$	$(111.67 \times 10^{-3} ; 670)$	1.0
Ø8	$(2.60 \times 10^{-3} ; 551.2)$	$(151.9 \times 10^{-3} ; 635.4)$	$(151.9 \times 10^{-3} ; 635.4)$	1.0
CFRP L20	$(17 \times 10^{-3} ; 2784)$	$(17 \times 10^{-3} ; 2784)$	$(17 \times 10^{-3} ; 2784)$	1.0
CFRP L10	$(14 \times 10^{-3} ; 2305)$	$(14 \times 10^{-3} ; 2305)$	$(14 \times 10^{-3} ; 2305)$	1.0
CFRP L80	$(15 \times 10^{-3} ; 2428)$	$(15 \times 10^{-3} ; 2428)$	$(15 \times 10^{-3} ; 2428)$	1.0
CFRP L100	$(14 \times 10^{-3} ; 2480)$	$(14 \times 10^{-3} ; 2480)$	$(14 \times 10^{-3} ; 2480)$	1.0

Nota: todas as tensões estão em MPa.

6.2.2 Lei de interface

Tal como foi referido anteriormente, na simulação das faixas de laje reforçadas com o sistema NSM CFRP foi considerada a existência de aderência perfeita entre o laminado de CFRP e o betão, enquanto que nos modelos numéricos relativos às faixas de laje reforçadas de acordo com a técnica EBR, o deslizamento do laminado foi permitido. De modo a simular o comportamento não linear da interface CFRP/betão, a relação em termos de tensão de corte *versus* deslizamento apresentada na equação (6.2) foi adotada. Os parâmetros τ_m e s_m

representam, respetivamente, a resistência da ligação e o correspondente deslizamento, enquanto que os parâmetros α e α' traduzem a forma da lei τ - s nas fases de pré-pico e pós-pico, respetivamente. O valor adotado para os parâmetros τ_m e s_m teve por base as informações incluídas nas fichas técnicas do adesivo e as informações retiradas dos ensaios de arranque direto e das respetivas simulações numéricas. Os restantes parâmetros, α e α' , sofreram alguns reajustes de forma a aproximar a resposta numérica da experimental. Assim, valores iguais a 0.1 mm, 4.3 MPa, 0.9 e 2, foram adotados respetivamente para os parâmetros s_m , τ_m , α e α' . Assumindo que a rigidez normal dos elementos de interface tem um efeito marginal no comportamento da ligação, um valor constante igual a 10^7 MPa/mm foi atribuído.

$$\tau(s) = \begin{cases} \tau_m (s/s_m)^\alpha & \text{se } s \leq s_m \\ \tau_m (s/s_m)^{\alpha'} & \text{se } s > s_m \end{cases} \quad (6.2)$$

6.2.3 Propriedades do betão

As propriedades em compressão do betão utilizado nas faixas de laje, mais concretamente os valores médios de resistência à compressão (f_{cm}) e módulo de elasticidade (E_{cm}), foram obtidos através dos ensaios à compressão descritos no Capítulo 3 do presente trabalho.

Contudo, a caracterização das propriedades do betão realizada revela-se escassa quando se pretende reproduzir o seu comportamento de forma precisa numa simulação numérica, visto que os modelos constitutivos para este material requerem a definição de um considerável número de parâmetros. Com o objetivo de se obter o valor de todos os parâmetros necessários para uma simulação adequada do comportamento do betão, algumas formulações foram utilizadas, tal como será apresentado em seguida.

De acordo com formulações propostas em Model Code (2010), o valor característico de resistência à compressão (f_{ck}) pode ser estimado através da equação (6.3).

$$f_{ck} = f_{cm} - 8 \text{ [MPa]} \quad (6.3)$$

Em termos de valor de coeficiente de *Poisson* (ν_c), este varia entre 0.1 e 0.2. Na simulação numérica das faixas de laje apresentada nesta secção, um valor de 0.15 foi adotado.

Em termos de resistência média à tração do betão (f_{ctm}), segundo as recomendações do Model Code (2010), esta pode ser estimada de acordo com a equação (6.4). O valor característico mínimo e máximo de resistência à tração ($f_{ctk,min}$ e $f_{ctk,max}$, respetivamente), de acordo com as mesmas recomendações, pode ser estimado através das equações (6.5) e (6.6). No presente estudo, um valor intermédio entre $f_{ctk,min}$ e $f_{ctk,max}$ foi considerado.

$$f_{ctm} = 0.3 f_{ck}^{2/3} \text{ [MPa]} \quad (6.4)$$

$$f_{ctk,min} = 0.7 f_{ctm} \text{ [MPa]} \quad (6.5)$$

$$f_{ctk,max} = 1.3 f_{ctm} \text{ [MPa]} \quad (6.6)$$

A energia requerida para se propagar uma fenda de tração de área unitária, designada por energia de fratura (G_f), foi estimada com base na formulação proposta em CEB (1993) e traduzida pela equação (6.7). Na referida equação, G_{f0} corresponde ao valor de base de energia de fratura e o seu valor depende da máxima dimensão do agregado, d_{max} . Quando d_{max} é igual a 8, 16 ou 32 mm, o valor do parâmetro G_{f0} é igual a 0.025, 0.030 ou 0.058 Nmm/mm², respetivamente.

$$G_f = 0.2 G_{f0} f_{cm}^{0.7} \text{ [Nmm/mm}^2\text{]} \quad (6.7)$$

Assim que o critério de rotura para abertura de fendas é atingido, isto é, a tensão principal máxima excede f_{ct} , o comportamento do betão fendilhado é regido pelo modelo de multi-fendas distribuídas de orientação fixa, o que permite que num único ponto de integração de um elemento finito possam surgir várias fendas não ortogonais. No Capítulo 2 deste trabalho, este conceito foi explicado com maior detalhe. Na simulação numérica das faixas de laje, diagramas trilineares de *tension-softening* e *tension-stiffening* (ver Figura 2.35 (a)) para simular a propagação de fratura em modo I, foram utilizados. De acordo com o diagrama utilizado, e de

modo a simular o comportamento pós-fendilhação do betão, é requerido o valor dos parâmetros ξ_1 , α_1 , ξ_2 e α_2 . Por sua vez, o modo II de propagação de fenda foi simulado de forma indireta por intermédio do fator de retenção da rigidez de corte do betão fendilhado.

As simulações numéricas das faixas de laje descritas nesta secção, foram desenvolvidas em duas fases distintas. A fase 1 de simulação foi efetuada antes dos ensaios experimentais de flexão terem sido realizados e após a caracterização dos materiais envolvidos nas faixas de laje. Assim, os modelos realizados nesta fase podem ser compreendidos como modelos de previsão do comportamento experimental. Por sua vez, a fase 2 de simulação foi desenvolvida posteriormente à realização dos ensaios experimentais de modo a que alguns ajustes nos modelos tenham sido estabelecidos. Assim, os modelos realizados na segunda fase podem ser compreendidos como modelos calibrados à resposta obtida experimentalmente.

A diferença entre os modelos de previsão e os modelos calibrados, prende-se no valor dos parâmetros requeridos pela lei trilinear que simula o comportamento do betão após a abertura de fendas. Nos modelos de previsão, apenas um diagrama trilinear de *tension-softening* foi utilizado e atribuído a todos os elementos finitos que simulavam o betão. Após a análise e comparação dos resultados obtidos nos modelos de previsão com os resultados experimentais, procedeu-se a alguns reajustes nos modelos numéricos das faixas de laje reforçadas com laminados de CFRP, de modo a ser contabilizado o efeito de *tension-stiffening*. Este fenómeno está relacionado com a maior capacidade de retenção de tensões de tração que o betão fendilhado reforçado apresenta, proporcionada por uma gradual redistribuição interna de esforços do betão para o material de reforço que induz a formação de fendas secundárias. Este processo de redistribuição de esforços e formação de fendas só termina com a estabilização do padrão de fendilhação e é responsável pelo aumento da rigidez do elemento estrutural tracionado (Sena-Cruz *et al.*, 2004; Sena-Cruz, 2005).

Como ao nível da secção transversal apenas a área de betão circundante ao reforço é afetada pelo fenómeno de *tension-stiffening*, a altura de secção efetivamente tracionada foi estimada de acordo com formulações propostas pelo Model Code (2010). Sendo assim, às três primeiras faixas de elementos finitos das lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP e às duas primeiras faixas de elementos finitos das lajes reforçadas com o sistema EBR CFRP (ver Figura 6.4), foi

atribuída uma lei trilinear de *tension-stiffening*, onde valores adequados para os parâmetros ξ_1 , α_1 , ξ_2 e α_2 , foram adotados. Nos restantes elementos finitos das faixas de laje, o mesmo diagrama trilinear de *tension-softening* atribuído aos elementos de betão dos modelos de previsão, foi admitido.

A Tabela 6.5 inclui as propriedades do betão adotadas nas simulações numéricas das faixas de laje.

Tabela 6.5 - Propriedades adotadas para o betão na simulação das faixas de laje.

Coefficiente de Poisson	$\nu_c = 0.15$
Módulo de elasticidade	$E_c = 25.8 \text{ GPa}$
Resistência à compressão	$f_c = 41.3 \text{ MPa}$
Diagrama trilinear <i>tension-softening</i>	$f_{ct} = 2.3 \text{ MPa}$; $G_f = 0.076 \text{ N/mm}$; $\xi_1 = 0.05$; $\alpha_1 = 0.1$; $\xi_2 = 0.055$; $\alpha_2 = 0.05$
Diagrama trilinear <i>tension-stiffening</i>	$f_{ct} = 2.3 \text{ MPa}$; $G_f = 0.12 \text{ N/mm}$; $\xi_1 = 0.085$; $\alpha_1 = 0.4$; $\xi_2 = 0.36$; $\alpha_2 = 0.3$
Parâmetro que define o modo I de energia de fratura disponível para uma nova fenda	$p_2 = 2$
Fator de retenção de corte	Cúbico ($p_1 = 3$)
Largura da banda de fendilhação	Raiz quadrada da área do elemento finito
Ângulo limite	$\alpha_{th} = 30^\circ$

6.2.4 Curvas força *versus* deslocamento a meio vão - Modelos de previsão

Na Figura 6.6 são apresentados os resultados em termos de curvas força *versus* deslocamento vertical a meio vão, obtidos nos modelos numéricos de previsão do comportamento estrutural à flexão das faixas de laje. Na mesma figura, é possível comparar a resposta obtida por via numérica com a respetiva resposta experimental, de modo a avaliar a precisão e a capacidade da simulação em cada uma das faixas de laje.

Os principais aspetos observados no ensaio experimental da faixa de laje de referência (REF) (ver Figura 6.6 (a)), tais como o início do processo de fendilhação do betão, a degradação da

sua rigidez, a cedência das armaduras longitudinais de reforço bem como a capacidade de carga da faixa de laje, foram simulados de forma muito precisa, obtendo-se uma curva numérica praticamente coincidente com a resposta experimental.

Relativamente às faixas de laje reforçadas com o sistema NSM CFRP (ver Figura 6.6 (b), (c) e (d)), os modelos de previsão do comportamento estrutural experimental permitiram reproduzir de forma muito eficiente as três fases de comportamento, mais concretamente, (i) a fase de comportamento elástico até ao instante de abertura de fendas, (ii) a fase fendilhada até à cedência das armaduras longitudinais de reforço e (iii) a fase de pós-cedência da armadura longitudinal de reforço. Contudo, os modelos numéricos não conseguiram prever a capacidade de carga das faixas de laje devido à não convergência do processo iterativo de *Newton-Raphson* para um nível de carga entre 80% a 90% da máxima carga obtida experimentalmente.

Por sua vez, os modelos numéricos das faixas de laje reforçadas com o sistema EBR CFRP (ver Figura 6.6 (e) e (f)), também revelaram grande capacidade de previsão da resposta estrutural obtida experimentalmente. As simulações numéricas, para além de terem permitido a reprodução muito precisa das três fases do comportamento estrutural das faixas de laje (fase elástica, fase fendilhada e fase de pós-cedência das armaduras longitudinais), permitiu prever de forma muito satisfatória a máxima carga atingida no instante em que ocorre a rotura por destacamento do sistema de reforço. Assim, pode ser concluído que a simulação numérica do comportamento de interface entre a superfície de betão e o laminado de CFRP, permitiu prever com elevada precisão o comportamento de aderência e a rotura por destacamento do sistema de reforço no instante em que a ligação atinge a sua resistência máxima, e que impossibilita que a capacidade resistente do laminado de CFRP não tenha sido utilizada de forma eficaz.

Contudo, apesar da enorme capacidade de previsão do comportamento global das faixas de laje demonstrada pelas simulações numéricas, é notável que as faixas de laje reforçadas apresentaram uma resposta sensivelmente menos rígida da obtida experimentalmente, a partir do instante de abertura de fendas. De acordo com o que já foi explicado anteriormente, esta subestimação da rigidez global do betão fendilhado, está relacionada com o efeito de *tension-stiffening* apresentado pelas faixas de laje reforçadas com laminados de CFRP.

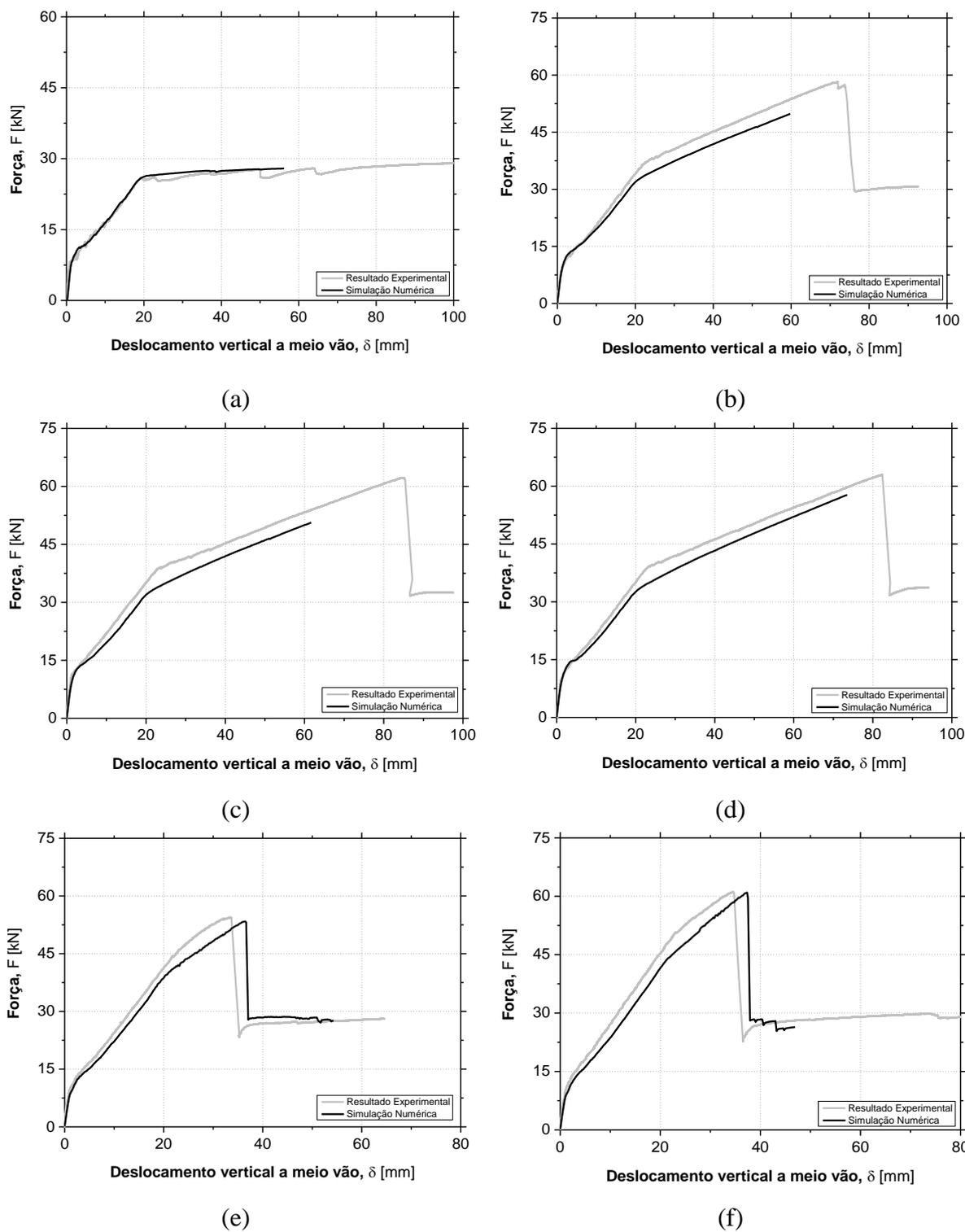


Figura 6.6 - Curvas força *versus* deslocamento vertical a meio vão das faixas de laje (comparação do resultado experimental e numérico): (a) REF; (b) NSM_L20_P1; (c) NSM_L10_G1; (d) NSM_L10_G2; (e) EBR_L80; (f) EBR_L100.

6.2.5 Curvas força *versus* deslocamento a meio vão - Modelos calibrados

De modo a ter em conta o efeito de *tension-stiffening* nas lajes reforçadas com o sistema FRP, procedeu-se a alguns ajustes nos modelos de previsão, tal como foi explicado anteriormente. Assim, de modo a simular este fenómeno, foi utilizado o digrama trilinear (ver Figura 2.35 (a)), onde o valor dos parâmetros ξ_1 , α_1 , ξ_2 e α_2 foram adequadamente ajustados (ver Tabela 6.5).

Na Figura 6.7, os resultados numéricos em termos de relação força *versus* deslocamento vertical a meio vão, para cada uma das faixas de laje reforçadas, são apresentados e comparados com o respetivo comportamento experimental obtido nos ensaios à flexão. Na Tabela 6.6, os valores de força obtidos nas simulações numéricas ($F_{cr,num}$, $F_{y,num}$ e $F_{max,num}$) e os respetivos deslocamentos verticais ($\delta_{cr,num}$, $\delta_{y,num}$ e $\delta_{max,num}$), são comparados aos valores de força e deslocamento obtidos experimentalmente.

Na simulação das faixas de laje reforçadas com o sistema NSM (ver Figura 6.7 (a), (b) e (c)), as três fases de comportamento (fase elástica, fase fendilhada e fase de pós-cedência da armadura longitudinal), foram reproduzidas de forma muito precisa, obtendo-se uma curva praticamente coincidente com a obtida experimentalmente. Tal como tinha sido verificado nos modelos de previsão, devido à não convergência do processo iterativo de *Newton-Raphson*, não foi possível simular a capacidade de carga das faixas de laje.

Assim como nos modelos de previsão do comportamento das faixas de laje reforçadas com o sistema EBR CFRP, os modelos calibrados também permitiram reproduzir de forma muito precisa as três fases do seu comportamento estrutural e a respetiva carga máxima resistente, atingida no instante em que a rotura por destacamento do sistema de reforço ocorre (ver Figura 6.7 (d) e (e)).

Com a consideração do fenómeno de *tension-stiffening*, as curvas obtidas nos modelos numéricos e apresentadas na Figura 6.7, são praticamente coincidentes com as respostas estruturais obtidas experimentalmente. Assim, ao contrário do que foi verificado nos resultados dos modelos de previsão, não existiu qualquer subestimação da rigidez global a partir do instante em que surgem as primeiras fendas no betão tracionado das faixas de laje reforçadas, tendo sido considerada a sua maior capacidade de retenção de tensões de tração.

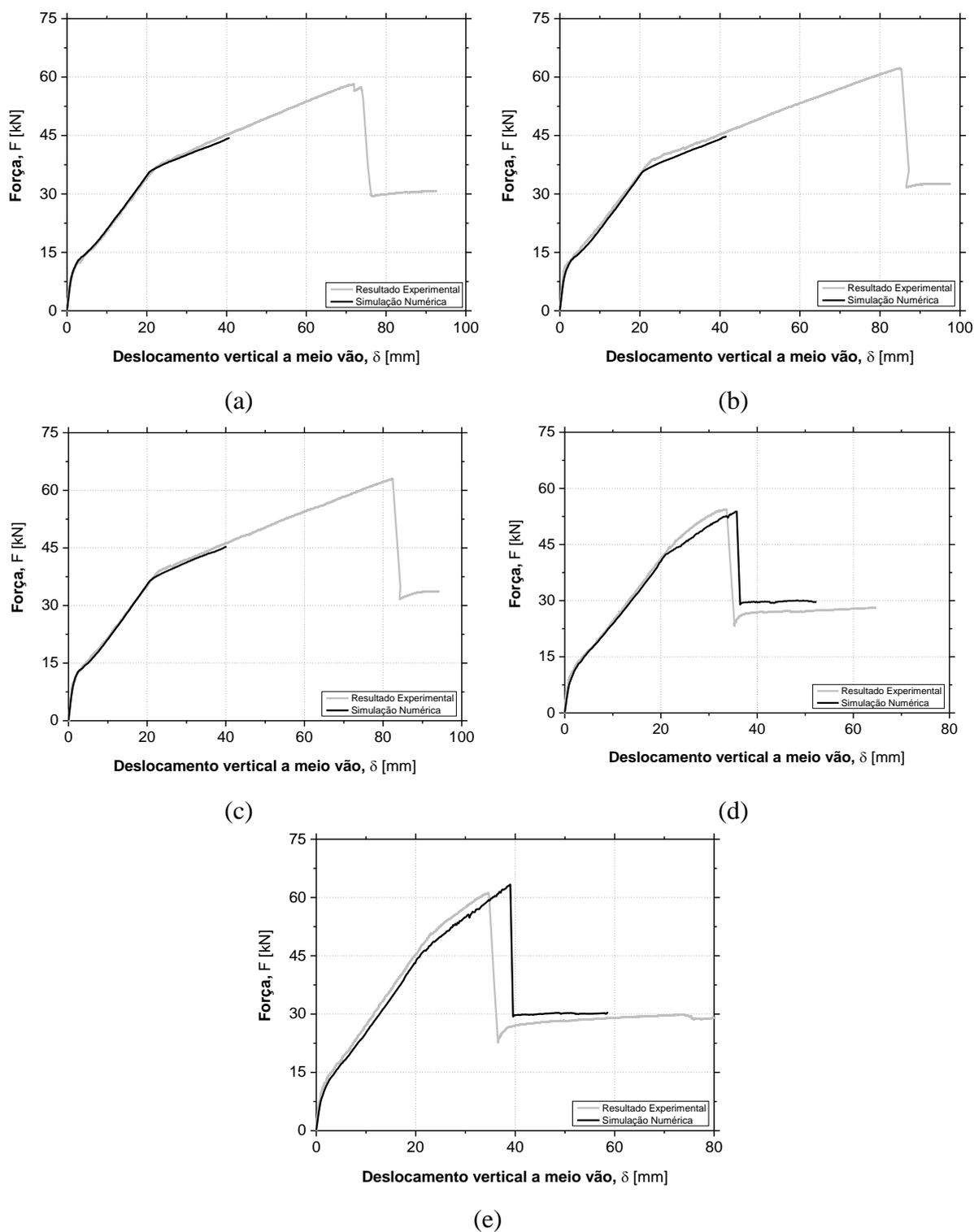


Figura 6.7 - Curvas força *versus* deslocamento vertical a meio vão das faixas de laje (comparação do resultado experimental e numérico): (a) NSM_L20_P1; (b) NSM_L10_G1; (c) NSM_L10_G2; (d) EBR_L80; (e) EBR_L100.

Tabela 6.6 - Comparação dos valores de força e dos respetivos deslocamentos verticais a meio vão obtidos nas simulações numéricas com os valores obtidos nos ensaios experimentais.

Faixa de laje	Início da fendilhação				Plastificação das armaduras				Carga máxima			
	$\delta_{cr,exp}$	$\delta_{cr,num}$	$F_{cr,exp}$	$F_{cr,num}$	$\delta_{y,exp}$	$\delta_{y,num}$	$F_{y,exp}$	$F_{y,num}$	$\delta_{max,exp}$	$\delta_{max,num}$	$F_{max,exp}$	$F_{max,num}$
	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]	[mm]	[mm]	[kN]	[kN]
REF	0.88	1.06	8.06	8.01	19.19	18.91	25.92	25.84	117.28 ⁽¹⁾	-	29.28 ⁽¹⁾	-
EBR_L80	0.98	1.07	9.62	8.18	21.94	21.82	44.46	43.01	33.42	35.74	54.44	53.85
EBR_L100	1.74	1.94	12.45	11.32	23.04	23.54	50.81	48.66	34.52	39.01	61.10	63.30
NSM_L20_P1	2.97	2.83	13.09	12.95	22.09	20.80	36.68	35.74	71.81	-	58.17	-
NSM_L10_G1	1.35	1.72	11.61	10.80	23.16	21.47	38.86	36.21	84.72	-	62.25	-
NSM_L10_G2	1.08	1.95	9.82	11.68	23.18	21.67	39.14	37.18	82.40	-	63.00	-

Notas: ⁽¹⁾ Valor máximo registado durante o ensaio experimental sem ter ocorrido rotura da laje devido a esmagamento do betão por compressão ou rotura das armaduras de reforço longitudinal de tração; os valores numéricos de força e deslocamento respetivos à laje REF foram obtidos através do modelo de previsão.

6.2.6 Curvas força *versus* extensão no laminado de CFRP

Na Figura 6.8, a relação em termos de força *versus* extensão no laminado de CFRP, obtida na simulação numérica das faixas de laje reforçadas, é apresentada. De modo a ser analisada a precisão do modelo numérico, a relação entre força *versus* extensão no laminado é comparada com a obtida experimentalmente (através da monitorização realizada pelos extensómetros), em duas secções de laminado distintas: (i) na secção a meio vão onde o resultado numérico é comparado com a leitura do extensómetro SG4 e (ii) numa secção mais próxima do início do comprimento de ancoragem, onde o resultado numérico é comparado com a leitura do extensómetro SG6. A disposição dos extensómetros ao longo do laminado de CFRP, nos ensaios experimentais, foi descrita com detalhe no Capítulo 3, mais concretamente na secção referente à geometria e configuração do ensaio, podendo esta ser visualizada na Figura 3.10. O último valor de extensão representado nas curvas experimentais da Figura 6.8, corresponde à

extensão no instante em que a força máxima é atingida, assim como nas curvas correspondentes à simulação das faixas de laje reforçadas com o sistema EBR CFRP. Relativamente às curvas correspondentes à simulação das faixas de laje reforçadas de acordo com a técnica NSM, o último valor de extensão corresponde ao valor calculado na última iteração convergida do modelo numérico.

Em termos gerais, a simulação numérica permitiu reproduzir de forma muito satisfatória as diferentes fases de solicitação da capacidade resistente dos laminados de CFRP, mais concretamente (i) a fase elástica, na qual o laminado se encontra pouco solicitado até ao instante em que o betão inicia o processo de fendilhação, (ii) a fase desde o início de fendilhação até à cedência das armaduras longitudinais, onde o betão tracionado vai deixando de contribuir para a rigidez global da laje e conseqüentemente a extensão no laminado de CFRP aumenta significativamente e (iii) a fase de pós-cedência das armaduras longitudinais, onde os laminados de CFRP são os responsáveis pela capacidade de carga da faixa de laje.

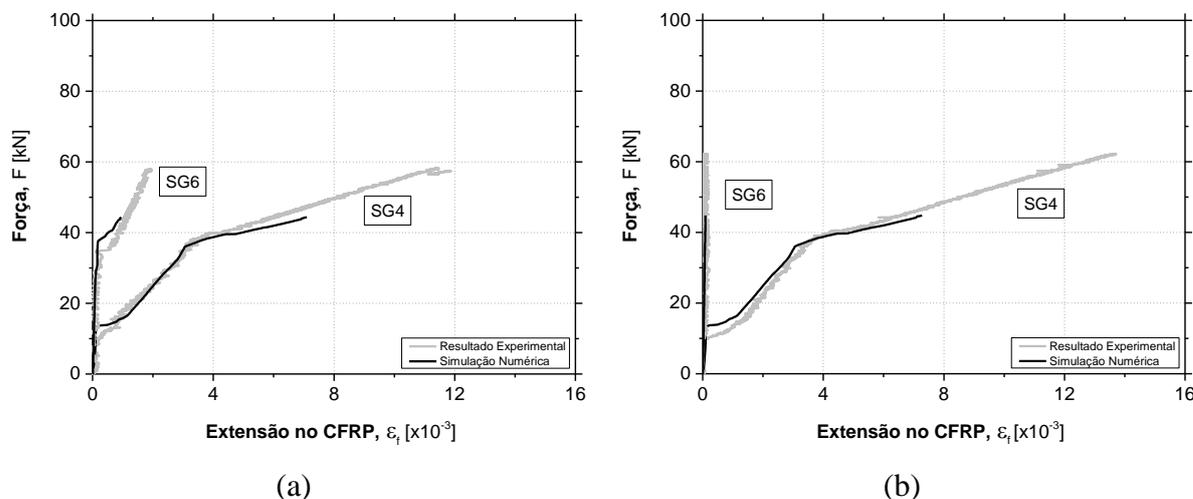


Figura 6.8 - Curvas força *versus* extensão no laminado de CFRP (comparação das medições efetuadas experimentalmente pelos extensómetros SG4 e SG6 com o resultado numérico): (a) NSM_L20_P1; (b) NSM_L10_G1; (c) NSM_L10_G2; (d) EBR_L80; (e) EBR_L100.

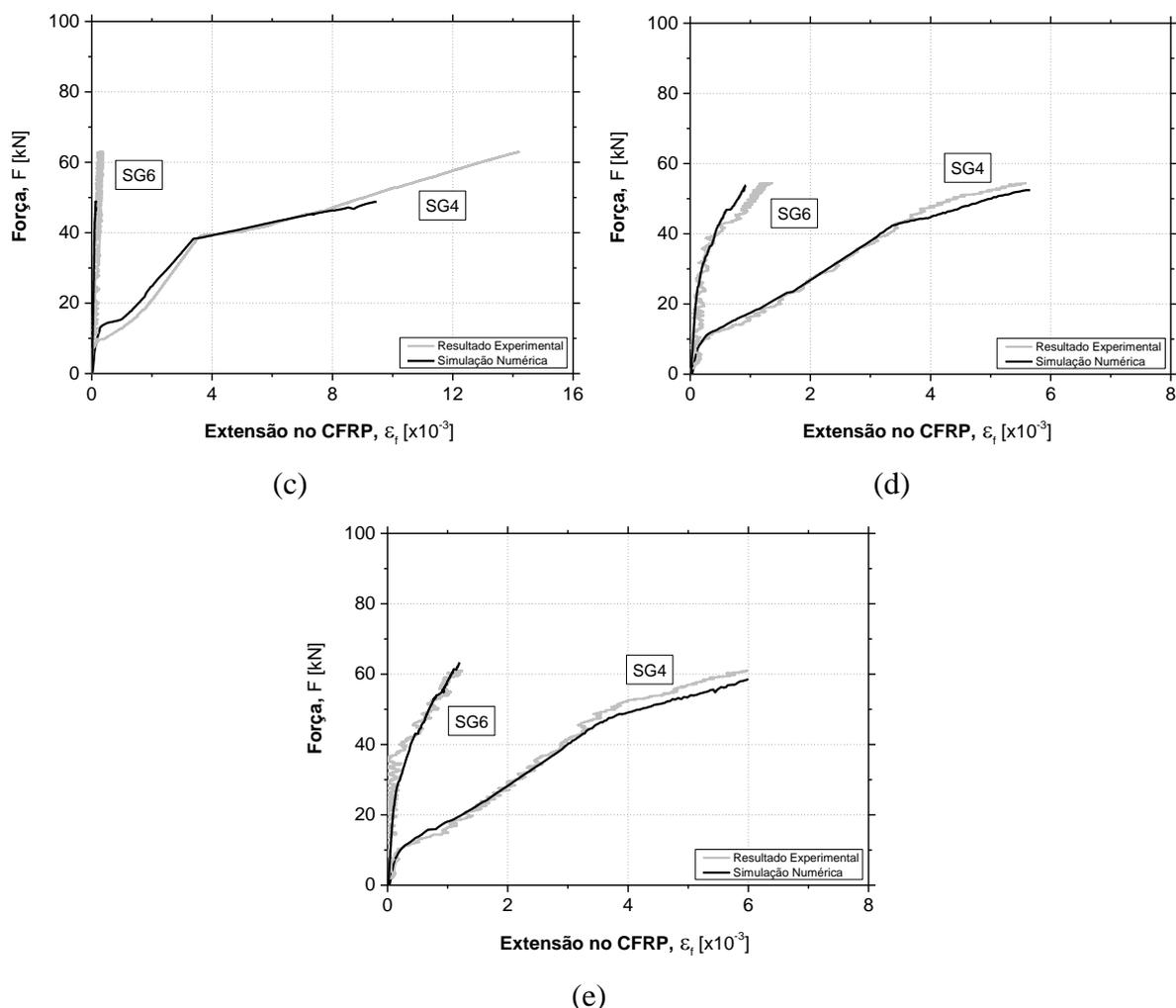


Figura 6.8 (cont.) - Curvas força *versus* extensão no laminado de CFRP (comparação das medições efetuadas experimentalmente pelos extensómetros SG4 e SG6 com o resultado numérico): (a) NSM_L20_P1; (b) NSM_L10_G1; (c) NSM_L10_G2; (d) EBR_L80; (e) EBR_L100.

6.2.7 Curvas força *versus* extensão a meio vão na armadura longitudinal

A Figura 6.9 apresenta a relação entre a força aplicada e a extensão experimentada pela armadura longitudinal inferior na secção de meio vão, obtida na simulação numérica das faixas de laje. Na mesma figura, o resultado numérico é comparado com o obtido experimentalmente através da monitorização efetuada pelo extensómetro SG1 em cada uma das faixas de laje. A disposição dos extensómetros instalados na armadura longitudinal inferior, nos ensaios experimentais, foi apresentada no Capítulo 3, mais concretamente na secção referente à geometria e configuração do ensaio, podendo ser visualizada na Figura 3.10. Nas curvas

apresentadas na Figura 6.9, o último valor de extensão corresponde ao instante em que ocorreu a cedência da armadura longitudinal.

Pela análise da Figura 6.9, é verificada a concordância entre a evolução das extensões na secção de meio vão da armadura longitudinal obtida na simulação numérica das faixas de lajes, com a monitorizada experimentalmente através do extensómetro SG1. O modelo numérico permitiu reproduzir de forma precisa as duas primeiras fases de níveis de solicitação da armadura longitudinal distintos: (i) a fase precedente à abertura de fendas no betão tracionado, onde as extensões experimentadas na secção a meio vão da armadura são muito reduzidas e (ii) a fase que sucede ao início do processo de fendilhação do betão, na qual é verificado um aumento significativo do nível de solicitação da armadura traduzido pelas extensões mais elevadas que experimenta.

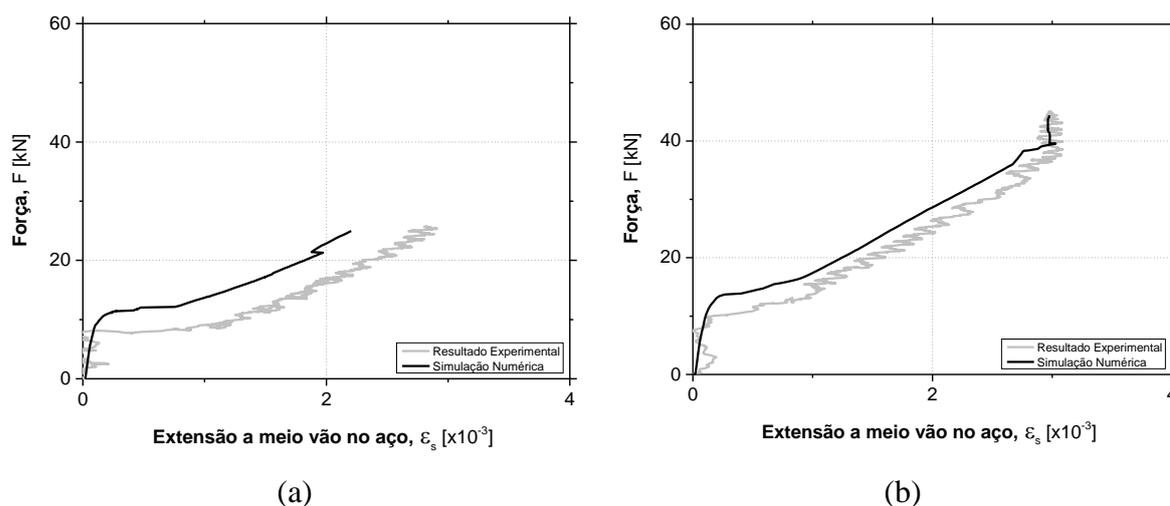


Figura 6.9 - Curvas força *versus* extensão no aço tracionado a meio vão das faixas de laje (comparação das medições efetuadas experimentalmente pelo extensómetro SG1 com o resultado numérico): (a) REF; (b) NSM_L20_P1; (c) NSM_L10_G1; (d) NSM_L10_G2; (e) EBR_L80; (f) EBR_L100.

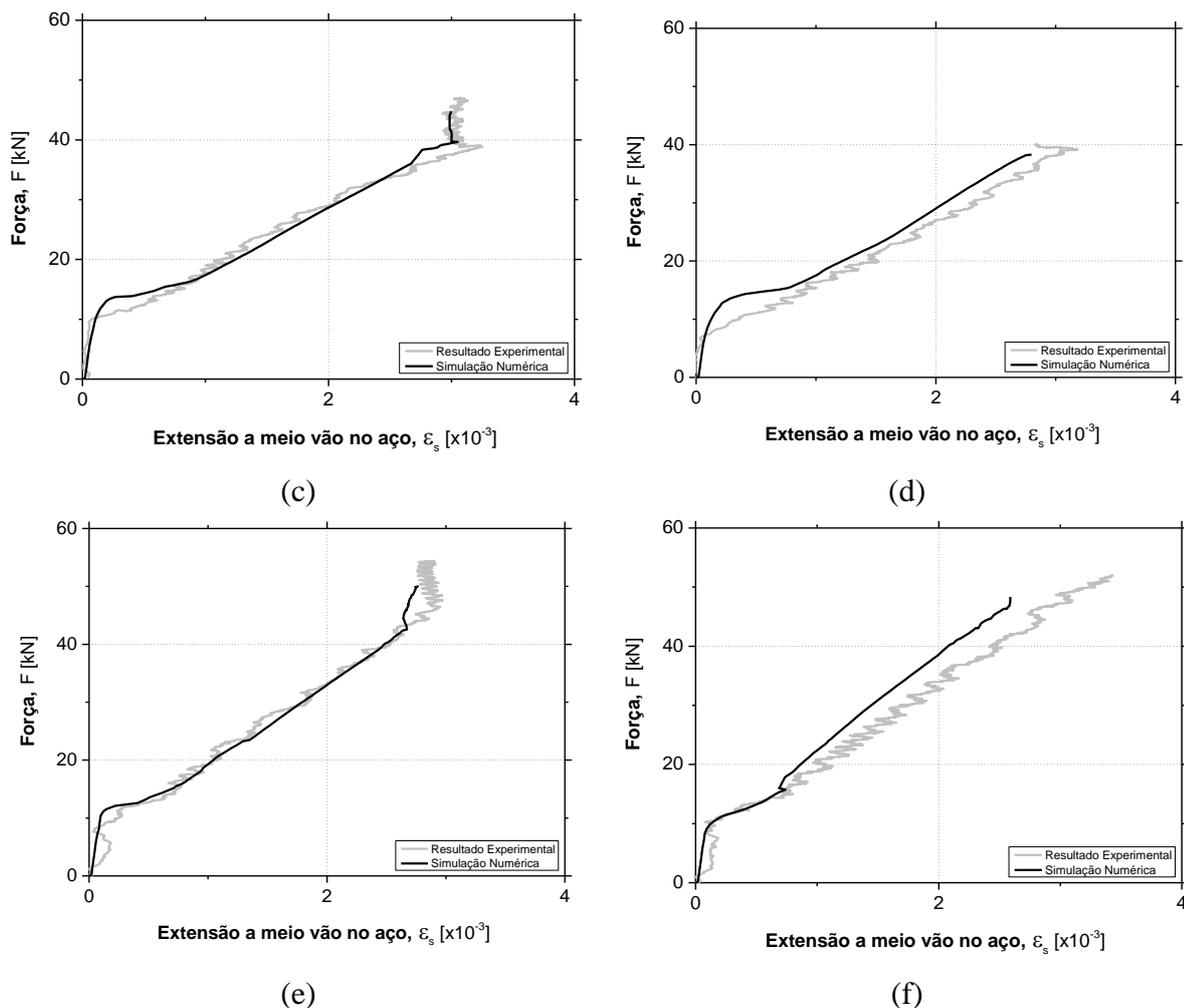


Figura 6.9 (cont.) - Curvas força *versus* extensão no aço tracionado a meio vão das faixas de laje (comparação das medições efetuadas experimentalmente pelo extensómetro SG1 com o resultado numérico): (a) REF; (b) NSM_L20_P1; (c) NSM_L10_G1; (d) NSM_L10_G2; (e) EBR_L80; (f) EBR_L100.

6.2.8 Padrões de fendilhação

Através das simulações numéricas desenvolvidas, também se torna possível efetuar uma análise dos padrões de fendilhação apresentados pelas faces laterais de cada uma das faixas de laje. Na Figura 6.10, o padrão de fendilhação, correspondente ao último incremento de carga convergido, é apresentado. Por sua vez, na Tabela 6.7 é efetuada uma comparação entre a extensão da banda de fendilhação obtida nas simulações numéricas, com a medida experimentalmente após a realização dos ensaios. Como apenas metade do comprimento

longitudinal das faixas de laje foi simulado, admitiu-se também uma simetria na extensão da banda de fendilhação.

De uma análise geral, os padrões de fendilhação obtidos nas simulações numéricas estão de acordo com os obtidos e analisados experimentalmente. Desde logo, é verificada a maior quantidade de fendas que todas as lajes reforçadas (Figura 6.10 (b) a (f)) apresentaram relativamente à laje de referência (Figura 6.10 (a)), tal como foi verificado na análise experimental (ver Capítulo 5). Além disso, observando os padrões de fendilhação obtidos nas simulações, observa-se que as lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP (Figura 6.10 (b), (c) e (d)) parecem apresentar uma maior quantidade de fendas e menos distanciadas entre si, relativamente às lajes reforçadas com o sistema EBR CFRP (Figura 6.10 (e) e (f)), facto esse também constatado experimentalmente.

Nas lajes reforçadas com a técnica EBR (ver Figura 6.10 (e) e (f)), é notável a formação de fendas de dimensão considerável na zona de meio vão, o que sugere que a rotura por destacamento do sistema EBR CFRP ocorreu devido à formação de fendas na zona de flexão pura das faixas de laje (*intermediate debonding*). Tal modo de rotura foi verificado experimentalmente e apresentado no Capítulo 5 (ver Figura 5.4 (a), (b) e (c)).

Analisando a Tabela 6.7, verifica-se uma aproximação muito satisfatória entre os valores numéricos e experimentais de extensão da banda de fendilhação. Tal como foi verificado experimentalmente (ver Capítulo 5, Figura 5.15), todas as lajes reforçadas apresentaram uma extensão da banda de fendilhação bastante próxima e superior à verificada na laje de referência.

Contudo, a influência das diferentes soluções de reforço adotadas no programa experimental das faixas de laje reforçadas com a técnica NSM, nos respetivos padrões de fendilhação, não foi possível ser analisada a partir das simulações numéricas 2D desenvolvidas.

De acordo com o analisado no Capítulo 5, a maior distribuição do material de reforço ao longo da secção transversal das faixas de laje reforçadas com o sistema NSM CFRP, permitiu obter uma significativamente maior quantidade de fendas de flexão e reduzir a distância média entre estas. Tal influência só seria possível ser prevista numericamente recorrendo a simulações tridimensionais. Além disso, quando aplicado o sistema NSM CFRP, fendas de deslizamento

secundárias (ver Figura 5.13) foram observadas na face inferior das faixas de laje, o que só seria possível simular numericamente através de análises tridimensionais onde o comportamento da interface entre o laminado de CFRP e o betão fosse considerado, permitindo o deslocamento relativo entre os dois materiais.

REF (a)



NSM_L20_P1 (b)



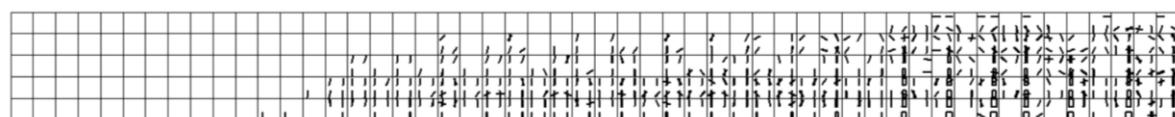
NSM_L10_G1 (c)



NSM_L10_G2 (d)



EBR_L80 (e)



EBR_L100 (f)

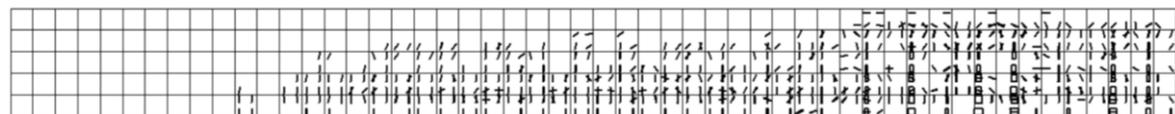


Figura 6.10 - Padrão de fendilhação obtido em cada uma das simulações numéricas das faixas de laje: (a) REF; (b) NSM_L20_P1; (c) NSM_L10_G1; (d) NSM_L10_G2; (e) EBR_L80; (f) EBR_L100.

Tabela 6.7 - Comparação da extensão da banda de fendilhação obtida nas simulações numéricas, com extensão da banda de fendilhação medida após o ensaio experimental.

Faixa de laje	Extensão da banda de fendilhação experimental [mm]	Extensão da banda de fendilhação numérica [mm]
REF	1565	1700
NSM_L20_P1	1795	2050
NSM_L10_G1	1805	2050
NSM_L10_G2	1783	2100
EBR_L80	1821	1900
EBR_L100	1803	2000

6.3 Conclusões

Os ensaios experimentais realizados no âmbito da presente dissertação foram simulados numericamente através do software *Femix 4.0*, que tem por base o método dos elementos finitos (MEF). Assim, de acordo com o programa experimental foram simulados: (i) ensaios de arranque direto em provetes prismáticos de betão reforçados com o sistema EBR CFRP, quando diferentes metodologias de tratamento de superfície (GR e SB) e diferentes comprimentos de ancoragem (150, 200, e 250 mm) foram utilizados, e (ii) ensaios de flexão em faixas de laje, mais concretamente a laje de referência (sem reforço CFRP), as lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP e as lajes reforçadas com o sistema EBR CFRP. A utilização das ferramentas numéricas permitiu prever de forma muito precisa os resultados experimentais e permitiu uma melhor interpretação do comportamento estrutural dos provetes de betão reforçados com sistemas FRP.

Na simulação dos ensaios de arranque direto e, tendo em conta o modo de rotura observado em todos os ensaios experimentais, toda a não linearidade do sistema foi localizada ao nível da interface CFRP/betão. De modo a simular o comportamento de aderência entre estes materiais recorreu-se a um modelo constitutivo de interface, onde apenas o modo II de fratura foi considerado. O valor dos parâmetros requeridos pelo modelo constitutivo foi ajustado de modo a aproximar a resposta global obtida numericamente em cada série de ensaios, com a respetiva resposta experimental. De forma geral as seguintes conclusões podem ser retiradas:

- Em termos de resposta força de arranque *versus* deslizamento da extremidade carregada, as simulações numéricas permitiram captar com sucesso as principais fases da resposta experimental: (i) fase inicial de comportamento aproximadamente linear (adesão química entre os materiais envolvidos) e (ii) a segunda fase onde o processo de destacamento do sistema de reforço se inicia (degradação da rigidez da ligação);
- Em termos de força máxima de arranque, as simulações numéricas proporcionaram boas previsões;
- Em termos de distribuição das extensões axiais no laminado de CFRP ao longo do comprimento de ancoragem, das simulações numéricas obtiveram-se resultados praticamente coincidentes com os experimentais até ao início do processo de destacamento. Contudo, a partir dessa fase, os resultados numéricos afastaram-se dos resultados experimentais.

Relativamente à simulação dos ensaios de flexão em faixas de laje e, tendo em conta os modos de rotura observados nos ensaios experimentais, nas lajes reforçadas de acordo com a técnica NSM foi assumida aderência perfeita entre o material de reforço e o betão, enquanto que nas lajes reforçadas com o sistema EBR CFRP, o comportamento de aderência entre a superfície de betão e o laminado de CFRP foi simulado. As simulações numéricas foram desenvolvidas em duas fases distintas: (i) antes da realização dos ensaios experimentais (modelos de previsão) e (ii) posteriormente à realização dos ensaios experimentais (modelos calibrados). De forma geral, as seguintes conclusões podem ser retiradas:

- Em termos de resposta força *versus* deslocamento vertical a meio vão, a totalidade das simulações numéricas desenvolvidas permitiram reproduzir com sucesso todas as fases do comportamento estrutural observadas experimentalmente: (i) a fase de comportamento elástico até ao instante de abertura de fendas, (ii) a fase fendilhada até à cedência das armaduras longitudinais de reforço e (iii) a fase de pós-cedência da armadura longitudinal de reforço. Contudo, ao contrário do sucedido na simulação numérica das faixas de laje reforçadas com o sistema EBR CFRP e laje de referência, não foi possível obter a capacidade de carga das faixas de laje reforçadas com o sistema NSM CFRP devido a instabilidades numéricas que impossibilitaram a convergência do processo iterativo de *Newton-Raphson*;

- Nos modelos de previsão relativos às faixas de laje reforçadas, apesar de ter sido reproduzido de forma muito satisfatória todas as fases do comportamento experimental, foi notável alguma subestimação da rigidez global na fase que sucede ao início de abertura de fendas no betão. Este aspeto foi relacionado com o efeito de *tension-stiffening* que não estaria a ser contabilizado adequadamente;
- Nos modelos calibrados, o efeito de *tension-stiffening* foi tido em conta. Em termos de relação força *versus* deslocamento vertical a meio vão, as curvas obtidas na simulação numérica das faixas de laje reforçadas foram praticamente coincidentes com as curvas obtidas experimentalmente, em todas as fases do seu comportamento estrutural;
- Tanto em termos de evolução das extensões nos laminados de CFRP como na armadura longitudinal inferior, a simulação numérica dos ensaios de flexão das faixas de laje permitiu reproduzir com enorme precisão a evolução das extensões obtida experimentalmente;
- Os padrões de fendilhação obtidos nas simulações numéricas, também apresentaram concordância com os observados experimentalmente.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

O trabalho experimental e numérico realizado no âmbito da presente dissertação, constituiu um programa alargado de estudos preliminares com o objetivo de contribuir no conjunto de tomadas de decisões no projeto de investigação *FRPLongDur*. Este possibilitou esclarecer algumas dúvidas sobre: (i) geometria e configurações de ensaio, (ii) diferentes soluções de reforço com recurso a laminados de CFRP e (iii) influência de alguns parâmetros no comportamento estrutural dos elementos reforçados. A investigação experimental foi constituída por dois tipos de ensaio: (i) ensaios de arranque direto para estudar o comportamento da ligação entre o sistema EBR CFRP e a superfície de betão e (ii) ensaios de flexão em faixas de laje de betão armado reforçadas com as técnicas EBR e NSM.

7.1 Principais conclusões

Um protocolo de ensaio de arranque direto foi desenvolvido no âmbito deste trabalho, no qual o seu bom desempenho foi confirmado. A instrumentação dos provetes incluiu diversos sensores (transdutores de deslocamento, célula de carga e extensometria). Os ensaios de arranque direto tiveram como principal objetivo caracterizar a aderência da ligação entre o laminado de CFRP e a superfície de betão dos provetes prismáticos, quando utilizada a técnica EBR. A influência do nível de rugosidade apresentado pela superfície de betão previamente à instalação do sistema de reforço, foi investigada. Para isso foram utilizadas duas diferentes metodologias de tratamento de superfície: (i) esmeril, onde se recorreu a uma mó de pedra até se tornarem visíveis os agregados (GR – *Grinding*) e (ii) jato de areia (SB – *Sand Blasting*). De modo a avaliar a eficiência das duas metodologias de tratamento, foi medido o nível de rugosidade de todas as superfícies previamente à instalação do sistema EBR CFRP, através de um sensor laser. Complementarmente, foram adotados três diferentes comprimentos de ancoragem (L_b): 150, 200 e 250 mm. A partir das medições efetuadas por intermédio de um sensor laser, foi verificado que o tratamento com jato de areia proporcionou à superfície de betão um maior nível de rugosidade relativamente ao tratamento com esmeril. Em todos os ensaios realizados, o modo de rotura observado foi o destacamento do sistema EBR CFRP com

remoção de uma fina camada de betão que surgiu colada ao laminado após a rotura. Quando aplicado o tratamento com jato de areia, essa camada de betão era mais espessa relativamente à observada quando aplicado o tratamento com esmeril. O nível de rugosidade apresentado pela superfície revelou-se um parâmetro muito influente na resistência da ligação. A aplicação de jato de areia em detrimento do esmeril permitiu aumentar a resistência da ligação, possibilitando que a rotura por destacamento do sistema de reforço ocorresse para níveis superiores de carga. Além disso, uma utilização mais eficiente da capacidade resistente do laminado foi permitida quando utilizado o jato de areia na preparação da superfície. Relacionando a rugosidade média (R_m) apresentada por cada uma das superfícies com a respetiva resistência da ligação obtida, a influência da rugosidade da superfície foi incluída na formulação de previsão da força de arranque máxima proposta pela CNR (2013), através do parâmetro k_R que depende diretamente do valor de R_m . O aumento do comprimento de ancoragem (L_b) também permitiu aumentar a resistência da ligação. Este aumento foi mais pronunciado quando se passou de um L_b de 150 mm para 200 mm, relativamente à passagem de um L_b de 200 mm para 250 mm, devido ao facto de o último ultrapassar o comprimento ótimo de ancoragem (l_e).

Os ensaios de flexão em faixas de laje foram estabelecidos de modo a avaliar os seguintes aspetos: (i) eficácia de ambas as técnicas de reforço utilizadas, (ii) largura do laminado de CFRP utilizado no reforço das faixas de laje com a técnica EBR (laminado L80 ou laminado L100), (iii) várias soluções de reforço com a técnica NSM que recorriam à mesma quantidade de material compósito, mas com diferentes níveis de distribuição ao longo da secção transversal das faixas de laje (2 laminados L20 ou 4 laminados L10). Além disso, a influência da distância transversal entre laminados consecutivos e da profundidade adotada para as ranhuras pré-executadas no betão de recobrimento, foi analisada. A instrumentação dos ensaios de flexão sob quatro pontos de carga incluiu transdutores de deslocamento, célula de carga, extensometria e microscópio manual. Em todas as lajes reforçadas, independentemente da técnica utilizada, foi observado um melhor comportamento estrutural relativamente à laje de referência (sem reforço), tanto em serviço como na capacidade última. No conjunto das faixas de laje reforçadas ensaiadas, dois modos de rotura foram observados, dependendo da técnica de reforço aplicada. Nas lajes reforçadas com a técnica EBR, a rotura ocorreu por destacamento do laminado de CFRP, numa fase em que apenas 42% da sua capacidade resistente tinha sido utilizada. No entanto, nas lajes reforçadas com o sistema NSM CFRP foi observada a rotura dos laminados

na zona de flexão pura, assim que a sua capacidade resistente foi esgotada. Em termos de padrão de fendilhação, o apresentado pelas lajes reforçadas de acordo com a técnica EBR, aproximou-se do observado na laje de referência, apesar da maior extensão da banda de fendilhação verificada. O sistema NSM CFRP, permitiu aumentar a quantidade de fendas de flexão, diminuir a distância entre estas e aumentar a extensão da banda de fendilhação (muito próxima da observada nas lajes reforçadas com o sistema EBR CFRP). Na solução de reforço que recorria a quatro laminados L10, estas últimas verificações foram mais pronunciadas devido à maior distribuição do material de reforço ao longo da secção transversal da faixa de laje. Para além disso, a maior distribuição do reforço nas lajes reforçadas com a técnica NSM, permitiu que valores superiores de carga de plastificação da armadura longitudinal (F_y), de carga máxima (F_{max}) e de extensão máxima experimentada pelos laminados de CFRP na rotura (ε_{fmax}), fossem registados, relativamente à solução que recorreu a dois laminados L20. Nas lajes reforçadas com o sistema EBR CFRP, verificou-se a influência da largura transversal do laminado utilizado no reforço. Com a utilização do laminado L100 por vez do laminado L80, valores superiores de carga de fendilhação (F_{cr}), de carga de plastificação da armadura longitudinal (F_y) e de carga máxima (F_{max}), foram registados.

Os ensaios experimentais realizados no âmbito desta dissertação (ensaios de arranque direto e ensaios de flexão em faixas de laje) foram simulados numericamente com recurso ao software *Femix 4.0*, que tem por base o método dos elementos finitos (MEF). Com a sua realização, foi verificada a enorme capacidade que as atuais ferramentas MEF possuem na simulação de elementos de betão reforçados com materiais compósitos do tipo FRP, permitindo uma melhor interpretação do seu comportamento estrutural. As simulações dos ensaios de arranque direto reproduziram com sucesso as principais fases do comportamento observado experimentalmente: (i) a fase precedente ao processo de destacamento (comportamento aproximadamente linear), (ii) a fase na qual o processo de destacamento se inicia (degradação da rigidez da ligação) e (iii) o valor da força de arranque máxima. Por sua vez, as simulações numéricas dos ensaios de flexão em faixas de laje também reproduziram de forma muito precisa todas as fases do comportamento observado experimentalmente: (i) a fase de comportamento elástico até ao início do processo de fendilhação, (ii) a fase fendilhada até à cedência das armaduras longitudinais de reforço e (iii) a fase de pós-cedência da armadura longitudinal. Na simulação das lajes reforçadas com o sistema EBR CFRP e da laje de referência, a capacidade de carga foi precisamente prevista pelo modelo numérico. Contudo, devido a algumas

instabilidades numéricas, não foi possível prever a capacidade de carga das faixas de laje reforçadas com o sistema NSM CFRP.

7.2 Retrospectiva do trabalho realizado e sugestões para futuros desenvolvimentos

Analisando todo o trabalho realizado no âmbito da presente dissertação, pode ser concluído que todos os objetivos pré-estabelecidos foram alcançados. Os estudos realizados tanto a nível experimental como analítico-numérico, contribuíram na tomada de decisões do projeto *FRPLongDur*. De forma mais concreta, a investigação experimental realizada permitiu: (i) esclarecer dúvidas em termos de configurações de ensaio a adotar no projeto e (ii) analisar a influência que vários parâmetros possuem no comportamento dos elementos estruturais reforçados com laminados de CFRP, tanto ao nível do comportamento de aderência como do comportamento à flexão. Por sua vez, a calibração dos modelos numéricos realizados na simulação dos ensaios experimentais, permitirá a concretização de estudos paramétricos com o objetivo de analisar a influência de diferentes parâmetros no comportamento estrutural dos elementos de betão reforçados, permitindo uma eventual dispensa de ensaios experimentais (morosos e dispendiosos).

Em termos de trabalhos futuros, alguns desenvolvimentos da investigação realizada podem ser sugeridos.

A nível experimental, sugere-se a análise de outras metodologias de preparação da superfície de betão, antes da instalação do sistema EBR CFRP, nos ensaios de arranque direto. No âmbito desta dissertação apenas foi utilizado o jato de areia e o esmeril de modo a analisar a influência da rugosidade da superfície que estes proporcionavam. Contudo, outros métodos têm sido utilizados de forma densificada pela comunidade científica, tais como as técnicas de picagem, a escarificação, a utilização de escovas de aço e o jato de água.

Outra sugestão passa pela utilização de um maior número de extensómetros ao longo da superfície dos laminados de FRP, nos ensaios de arranque direto, com o objetivo de se registar de uma forma quase contínua as extensões ao longo do seu eixo longitudinal, desde a

extremidade carregada até à extremidade livre do comprimento de ancoragem. Por motivos de limitação de custos, no presente trabalho o número de extensómetros utilizado foi reduzido. Este aspeto prejudicou não só a análise do processo de destacamento do sistema de reforço, mas, também, a comparação dos resultados obtidos experimentalmente com os obtidos nas simulações numéricas. Além disso, torna-se importante destacar o facto de que uma eventual utilização de um maior número de extensómetros ao longo da superfície do laminado permitiria obter as respetivas leis locais de interface e conseqüentemente realizar uma análise mais aprofundada do comportamento da ligação entre o laminado de CFRP e a superfície de betão. Complementarmente, a influência das diversas metodologias de preparação da superfície de betão, no comportamento da ligação, poderia também ser analisada comparando as leis de interface obtidas quando cada uma delas fosse utilizada.

No estudo do comportamento à flexão das faixas de laje reforçadas com a técnica EBR, sugere-se também o estudo da influência da rugosidade apresentada pela superfície de betão previamente à instalação do sistema de reforço, de modo a comparar o seu grau de influência com o verificado nos ensaios de arranque direto.

No que diz respeito ao comportamento à flexão das faixas de laje reforçadas com a técnica NSM, sugere-se o estudo da influência da taxa de reforço longitudinal (materializada em laminados de FRP) adotada no reforço. Este estudo seria um complemento aos parâmetros analisados na investigação experimental desta dissertação, tais como o nível de distribuição do material compósito ao longo da secção transversal da faixa de laje e da distância adotada entre laminados consecutivos. Contudo, no presente trabalho, o nível de reforço adotado estava limitado por imposições do projeto *FRPLongDur*, que requeria que a carga máxima registada no ensaio das lajes reforçadas fosse aproximadamente o dobro da registada na laje de referência.

Por sua vez, podem ser sugeridos alguns desenvolvimentos do trabalho numérico realizado, tais como: (i) a realização de estudos paramétricos posteriormente à calibração dos modelos, o que permitiria analisar a influência de diversos parâmetros no comportamento dos elementos reforçados e (ii) o desenvolvimento de modelos 3D na simulação dos ensaios de arranque direto e dos ensaios de flexão em faixas de laje, comparando os resultados com os já obtidos nas simulações 2D.

Como foi concluído neste trabalho, nas simulações 2D dos ensaios de flexão em faixas de laje reforçadas com o sistema NSM CFRP, não foi possibilitada a análise da influência das diferentes soluções de reforço que se distinguem no nível de distribuição e posição dos laminados ao longo da secção transversal da laje. Um desenvolvimento interessante seria a simulação 3D desses ensaios em complementaridade com a simulação do comportamento de interface entre os laminados de CFRP e o betão. Assim, para além da simulação do comportamento global das faixas de laje (onde os modelos 2D já demonstraram enorme competência), poderia ser comparado o padrão de fendilhação obtido nas simulações com o observado experimentalmente, incluindo fendas de flexão e fendas secundárias que surgem devido ao deslizamento do laminado de CFRP em relação ao betão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI, (1996). State of the art report on fiber reinforced plastic reinforcement for concrete structures. ACI Committee 440.
- Aiello, M. A. & Leone, M. (2008). Interface analysis between FRP EBR system and concrete. *Composites Part B: Engineering*, 39, 618-626.
- Al-Mahmoud, F., Castel, A., François, R. & Tourneur, C. (2011). Anchorage and tension-stiffening effect between near-surface-mounted CFRP rods and concrete. *Cement and Concrete Composites*, 33, 346-352.
- Asplund, S. (1949). Strengthening bridge slabs with grouted reinforcement. In: *Journal Proceedings*. 397-406.
- Azevedo, Á. (1996). Mecânica dos sólidos. *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*.
- Azevedo, Á. F. (2011). Método dos elementos finitos. *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*.
- Barros, J. A. (2004). Materiais compósitos no reforço de estruturas. *Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho*.
- Barros, J. A., Dias, S. J. & Lima, J. L. (2007). Efficacy of CFRP-based techniques for the flexural and shear strengthening of concrete beams. *Cement and Concrete Composites*, 29, 203-217.
- Barros, J. A. & Fortes, A. (2005). Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits. *Cement and Concrete Composites*, 27, 471-480.
- Bilotta, A., Ceroni, F., Di Ludovico, M., Nigro, E., Pecce, M. & Manfredi, G. (2011). Bond efficiency of EBR and NSM FRP systems for strengthening concrete members. *Journal of Composites for Construction*, 15, 757-772.
- Bonaldo, E., Barros, J. A. & Lourenço, P. B. (2007). Influence of the spacing between NSM-CFRP laminates on the flexural strengthening efficacy of RC slabs. In: *International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS8)*, Patras, Grécia, julho 16-18.
- Broek, D. (2012). The practical use of fracture mechanics, Springer Science & Business Media.
- CEB, C. (1993). model code 1990. *Comité Euro-International du Béton*, Thomas Telford Services Ltd., London, England.
- CNR (2013). Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati. *CNR-DT 200 R1/2013*.
- Code, M. (2010). First complete draft. *Bulletin*, 55. In: *Comité Euro-International du Béton. Secretariat Permanent*, Lausanne, Suíça.
- Coelho, M., Caggiano, A., Sena-Cruz, J. & Neves, L. (2016). Fracture-based interface model for NSM FRP systems in concrete. *Composite Structures*, Vol. 152, pp. 816-828.
- Coelho, M. R. F., Sena-Cruz, J. M. & Neves, L. A. C. (2015). A review on the bond behavior of FRP NSM systems in concrete. *Construction and Building Materials*, 93, 1157-1169.
- Correia, L., Teixeira, T., Michels, J., Almeida, J. A. P. P. & Sena-Cruz, J. (2015). Flexural behaviour of RC slabs strengthened with prestressed CFRP strips using different anchorage systems. *Composites Part B: Engineering*, 81, 158-170.
- Costa, I. & Barros, J. A. (2011). Assessment of the bond behaviour of NSM FRP materials by pullout tests. In: *First Middle East Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures (SMAR 2011)*. International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (ISHMII), 1-9.

- Cruz, J. R. L. (2016). Influência do tipo de adesivo no comportamento de elementos de betão reforçados com laminados de CFRP de acordo com a técnica NSM. Universidade do Minho.
- Czaderski, C. & Motavalli, M. (2007). 40-Year-old full-scale concrete bridge girder strengthened with prestressed CFRP plates anchored using gradient method. *Composites Part B: Engineering*, 38, 878-886.
- De Lorenzis, L., Miller, B. & Nanni, A. (2001). Bond of fiber-reinforced polymer laminates to concrete. *ACI Materials Journal*, 98, 256-264.
- De Lorenzis, L. & Nanni, A. (2002). Bond between near-surface mounted fiber-reinforced polymer rods and concrete in structural strengthening. *ACI structural Journal*, 99, 123-132.
- De Lorenzis, L., Nanni, A. & La Tegola, A. (2000). Strengthening of reinforced concrete structures with near surface mounted FRP rods. In: *International Meeting on Composite Materials, PLAST 2000, Proceedings, Advancing with Composite*, 9-11.
- De Lorenzis, L., Rizzo, A. & La Tegola, A. (2002). A modified pull-out test for bond of near-surface mounted FRP rods in concrete. *Composites Part B: Engineering*, 33, 589-603.
- De Lorenzis, L. & Teng, J. G. (2007). Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures. *Composites Part B: Engineering*, 38, 119-143.
- El-Hacha, R., Wight, R. G. & Green, M. F. (2001). Prestressed fibre-reinforced polymer laminates for strengthening structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 3, 111-121.
- El Maaddawy, T. & Soudki, K. (2008). Strengthening of reinforced concrete slabs with mechanically-anchored unbonded FRP system. *Construction and Building Materials*, 22, 444-455.
- Fernandes, P., Sena-Cruz, J., Fernandes, C., Silva, P., Costa, D. D. d. & Júlio, E. (2013). Flexural response of HSC girders strengthened with non-and prestressed CFRP laminates. In: *FRPRCS-11: 11th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer for Reinforced Concrete Structures*. Universidade do Minho.
- Fernandes, P. M., Silva, P. M. & Sena-Cruz, J. (2015). Bond and flexural behavior of concrete elements strengthened with NSM CFRP laminate strips under fatigue loading. *Engineering Structures*, 84, 350-361.
- Fernandes, P. M. G. (2016). Bond behaviour of NSM CFRP-concrete systems: durability and quality control. Tese de doutoramento, Universidade do Minho.
- Fernandes, P. M. G., Silva, P., Sena-Cruz, J., Xavier, J., Coelho, M. R. F. & Barros, J. A. (2012). Diferentes métodos de avaliação do comportamento da ligação de laminados de CFRP ao betão de acordo com a técnica NSM. *Encontro Nacional Betão Estrutural (BE2012)*, FEUP, Porto.
- FIEC (2016). Construction in Europe, key figures activity year 2015.
- Guadagnini, M., Serbescu, A., Palmieri, A., Matthys, S., Bilotta, A., Nigro, E., Ceroni, F., Czaderski, C., Olia, S. & Szambo, Z. (2012). Round robin test on the bond behaviour of externally bonded frp systems to concrete. In: *Proceedings of CICE 2012, 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, Rome, Italy, CD ROM. 13-15.
- Hosseini, M. M., Dias, S. J. & Barros, J. A. (2014). Effectiveness of prestressed NSM CFRP laminates for the flexural strengthening of RC slabs. *Composite Structures*, 111, 249-258.
- Iovinella, I., Prota, A. & Mazzotti, C. (2013). Influence of surface roughness on the bond of FRP laminates to concrete. *Construction and Building Materials*, 40, 533-542.

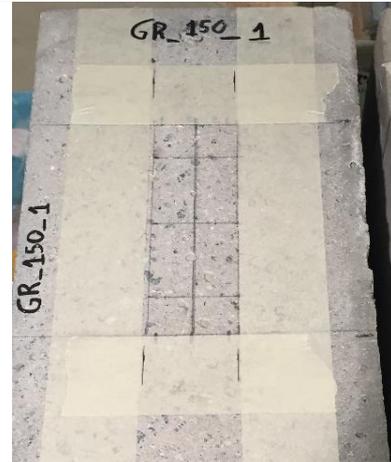
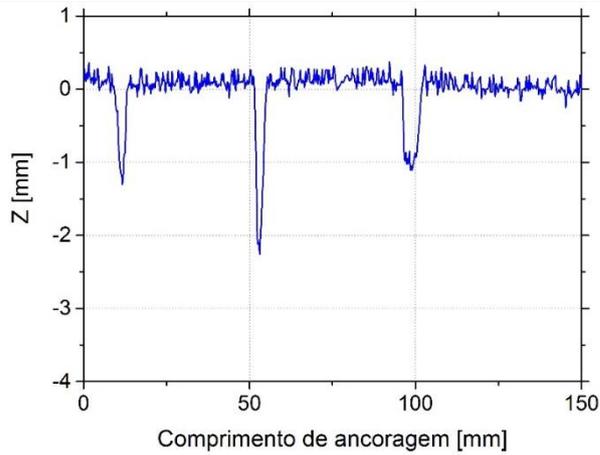
- Kalupahana, W. (2009). Anchorage and bond behaviour of near surface mounted fibre reinforced polymer bars. PhD thesis. *Department of Architecture and Civil Engineering, University of Bath*.
- Kim, Y. J., Shi, C. & Green, M. F. (2008). Ductility and cracking behavior of prestressed concrete beams strengthened with prestressed CFRP sheets. *Journal of composites for construction*, 12, 274-283.
- Kotynia, R., Walendziak, R., Stoecklin, I. & Meier, U. (2010). RC slabs strengthened with prestressed and gradually anchored CFRP strips under monotonic and cyclic loading. *Journal of Composites for Construction*, 15, 168-180.
- Liu, I., Oehlers, D. & Seracino, R. (2006). Tests on the ductility of reinforced concrete beams retrofitted with FRP and steel near-surface mounted plates. *Journal of Composites for Construction*, 10, 106-114.
- Markets, R. a. (2013). Opportunities for composites in the European construction market - forecasts to 2018.
- Markets, R. a. (2015). Opportunities for Composites in European Construction Market 2015-2020: Trends, Forecast, and Opportunity Analysis.
- Marques, N. F. A. A. (2009). Procedimentos de aplicação e controlo de qualidade para reforço com sistemas compósitos de FRP. FEUP.
- Mazzotti, C., Bilotta, A., Carloni, C., Ceroni, F., D'Antino, T., Nigro, E. & Pellegrino, C. (2016). Bond Between EBR FRP and Concrete. In: PELLEGRINO, C. & SENA-CRUZ, J. (eds.) Design Procedures for the Use of Composites in Strengthening of Reinforced Concrete Structures: *State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 234-DUC*. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Michels, J., Barros, J., Costa, I., Sena-Cruz, J., Czaderski, C., Giacomini, G., Kotynia, R., Lees, J., Pellegrino, C. & Zile, E. (2016). Prestressed FRP Systems. Design Procedures for the Use of Composites in Strengthening of Reinforced Concrete Structures. In: *State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 234-DUC*, Springer; 2016. 392.
- Michels, J., Sena-Cruz, J., Czaderski, C. & Motavalli, M. (2013). Structural strengthening with prestressed CFRP strips with gradient anchorage. *Journal of Composites for Construction*, 17, 651-661.
- Mukherjee, A. & Rai, G. L. (2009). Performance of reinforced concrete beams externally prestressed with fiber composites. *Construction and Building Materials*, 23, 822-828.
- Nakaba, K., Kanakubo, T., Furuta, T. & Yoshizawa, H. (2001). Bond behavior between fiber-reinforced polymer laminates and concrete. *Structural Journal*, 98, 359-367.
- Nooru-Mohamed, M. B. (1992). Mixed-mode fracture of concrete: an experimental approach, TU Delft, Delft University of Technology, Holanda.
- Novidis, D. & Pantazopoulou, S. (2008a). Beam pull out tests of NSM-FRP and steel bars in concrete. In: *Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008)*. 22-24.
- Novidis, D. & Pantazopoulou, S. (2008b). Bond tests of short NSM-FRP and steel bar anchorages. *Journal of Composites for Construction*, 12, 323-333.
- Oehlers, D., Rashid, R. & Seracino, R. (2008). IC debonding resistance of groups of FRP NSM strips in reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 22, 1574-1582.
- Palmieri, A., Matthys, S., Barros, J. A., Costa, I., Bilotta, A., Nigro, E., Ceroni, F., Szambo, Z. & Balazs, G. (2012). Bond of NSM FRP strengthened concrete: round robin test initiative. In: *CICE 2012 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, 1-8.
- Pellegrino, C. & Modena, C. (2009). Flexural strengthening of real-scale RC and PRC beams with end-anchored pretensioned FRP laminates. *ACI Structural Journal*, 106, 319.

- Reza Aram, M., Czaderski, C. & Motavalli, M. (2008). Effects of gradually anchored prestressed CFRP strips bonded on prestressed concrete beams. *Journal of Composites for Construction*, 12, 25-34.
- Santos, P. M. & Júlio, E. N. Caracterização e Quantificação da Textura de Superfícies de Betão. Savoia, M., Mazzotti, C. & Ferracuti, B. (2007). Mode II fracture energy and interface law for FRP concrete bonding with different concrete surface preparations. *In: FRAMCOS-6 conference proceedings*, Catania, IT.
- Sena-Cruz, J. (2005). Strengthening of concrete structures with near-surface mounted CFRP laminate strips. PhD thesis, University of Minho.
- Sena-Cruz, J., Barros, J., Bianco, V., Bilotta, A., Bournas, D., Ceroni, F., Dalfré, G., Kotynia, R., Monti, G. & Nigro, E. (2016). NSM systems. Design Procedures for the Use of Composites in Strengthening of Reinforced Concrete Structures. *In: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 234-DUC*, Springer; 2016. 392.
- Sena-Cruz, J., Barros, J., Coelho, M. & Pellegrino, C. (2014). Advancements in Retrofitting Reinforced Concrete Structures by the Use of CFRP Materials. *In: COSTA, A., GUEDES, M. J. & VARUM, H. (eds.) Structural Rehabilitation of Old Buildings*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Sena-Cruz, J., Barros, J. A. & Azevedo, Á. F. (2004). Modelação de vigas reforçadas com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento, *Encontro Nacional Betão Estrutural (BE2004)*, FEUP, Porto.
- Sena-Cruz, J., Barros, J. A., Azevedo, Á. F. & Gouveia, A. V. (2007). Numerical simulation of the nonlinear behavior of RC beams strengthened with NSM CFRP strips. *CNME 2007- Congress on Numerical Methods in Engineering and XXVIII CILAMCE - Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, Paper no. 485*, FEUP, Porto, 20 pp.
- Sena-Cruz, J., Barros, J. A. & Dias, S. J. (2011). 1º seminário sobre o projeto de reforço de estruturas de betão com FRP's.
- Sena-Cruz, J., Barros, J. A., Silva, L. F. & Coelho, M. R. F. (2010). Eficiência de diferentes técnicas de reforço à flexão de vigas de betão armado. *Encontro Nacional Betão Estrutural (BE2010)*.
- Sena-Cruz, J. M., Barros, J. A., Coelho, M. R. & Silva, L. F. (2012). Efficiency of different techniques in flexural strengthening of RC beams under monotonic and fatigue loading. *Construction and Building Materials*, 29, 175-182.
- Seracino, R., Jones, N. M., Ali, M., Page, M. W. & Oehlers, D. J. (2007). Bond strength of near-surface mounted FRP strip-to-concrete joints. *Journal of Composites for Construction*, 11, 401-409.
- Sharaky, I., Torres, L., Comas, J. & Barris, C. (2014). Flexural response of reinforced concrete (RC) beams strengthened with near surface mounted (NSM) fibre reinforced polymer (FRP) bars. *Composite Structures*, 109, 8-22.
- Subramaniam, K. V., Carloni, C. & Nobile, L. (2007). Width effect in the interface fracture during shear debonding of FRP sheets from concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 74, 578-594.
- Teixeira, T. A. N., Correia, L. L. G., Sena-Cruz, J. & Michels, J. (2014). Reforço à flexão de lajes de betão armado com laminados de CFRP pré-esforçados: comportamento em estado limite último e de utilização. *Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, 1-14.

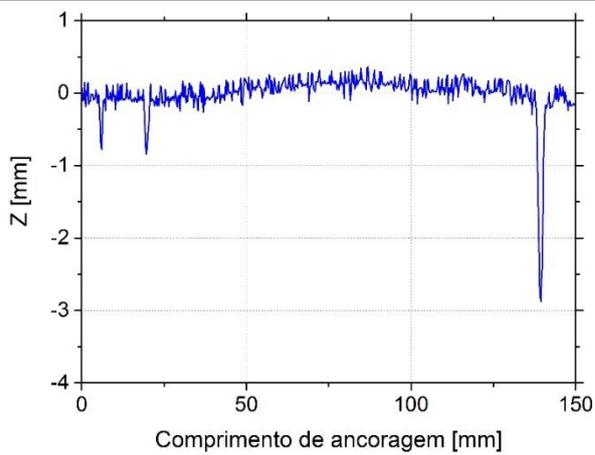
- Teng, J., De Lorenzis, L., Wang, B., Li, R., Wong, T. & Lam, L. (2006). Debonding failures of RC beams strengthened with near surface mounted CFRP strips. *Journal of Composites for Construction*, 10, 92-105.
- Toutanji, H. & Ortiz, G. (2001). The effect of surface preparation on the bond interface between FRP sheets and concrete members. *Composite structures*, 53, 457-462.
- Ueda, T. & Dai, J. (2005). Interface bond between FRP sheets and concrete substrates: properties, numerical modeling and roles in member behaviour. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 7, 27-43.
- Yao, J., Teng, J. & Chen, J. (2005). Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints. *Composites Part B: Engineering*, 36, 99-113.

ANEXO I - Resultados da medição do nível de rugosidade ao longo do perfil longitudinal central do comprimento de ancoragem dos provetes prismáticos

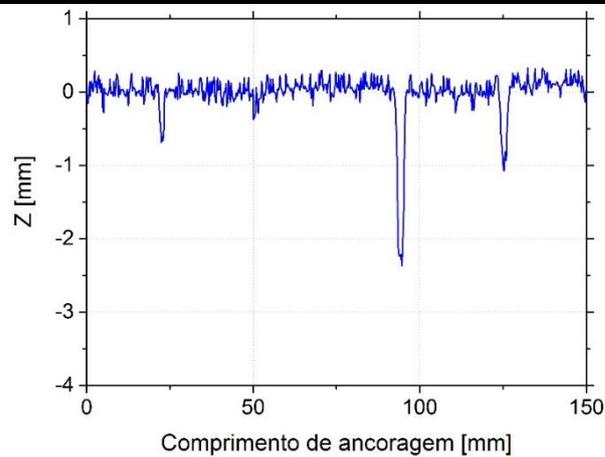
GR_Lb150_1



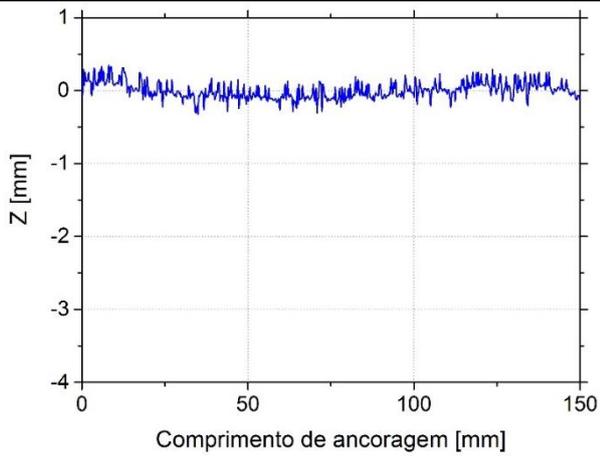
GR_Lb150_2



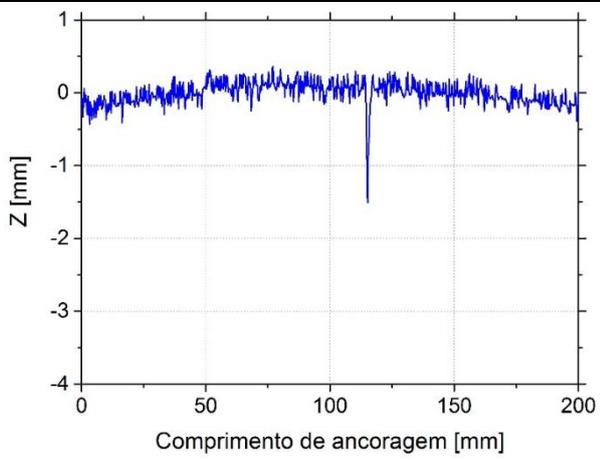
GR_Lb150_3



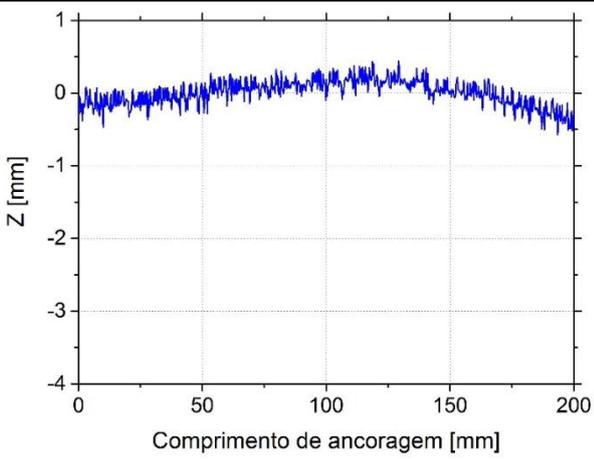
GR_Lb150_4



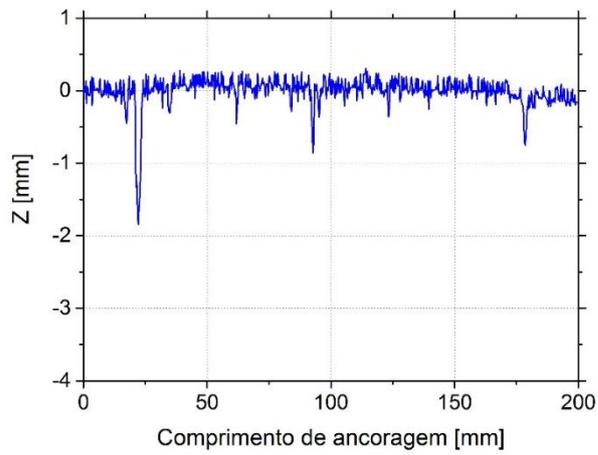
GR_Lb200_1



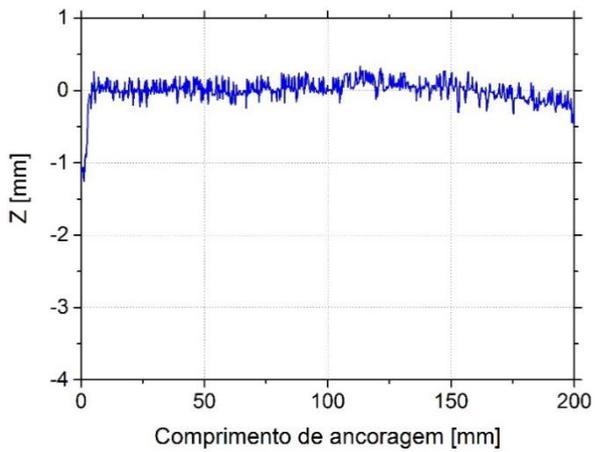
GR_Lb200_2



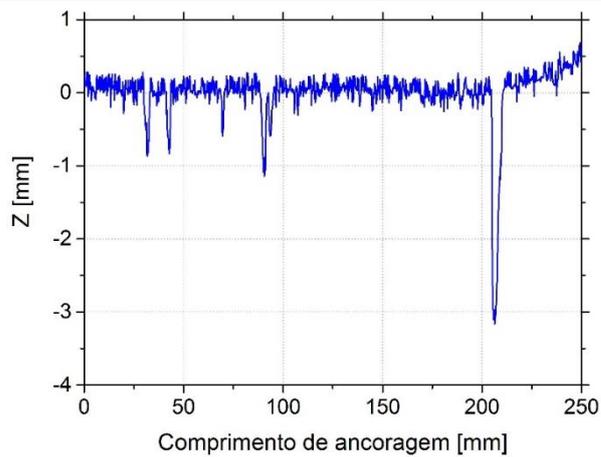
GR_Lb200_3



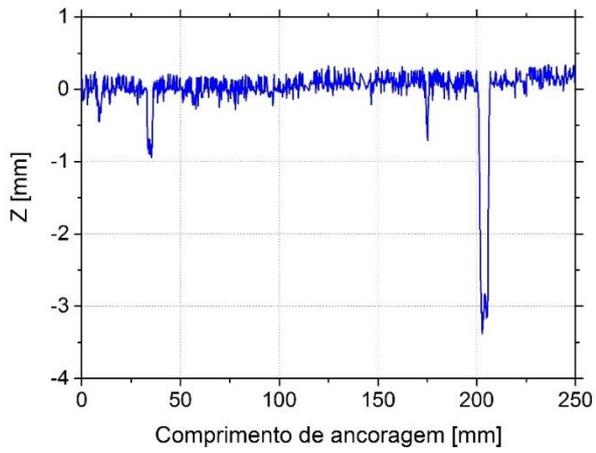
GR_Lb200_4



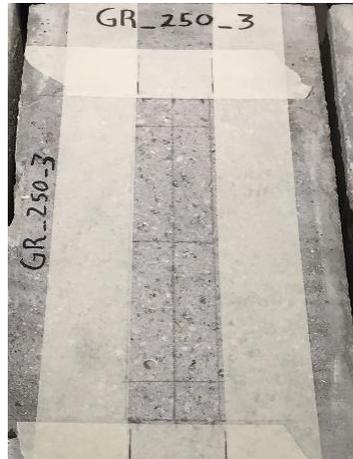
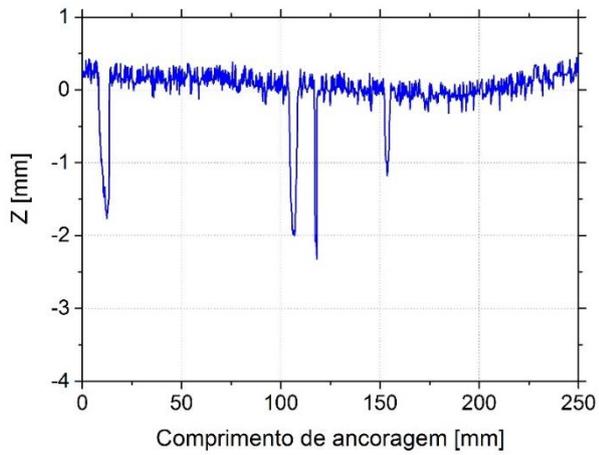
GR_Lb250_1



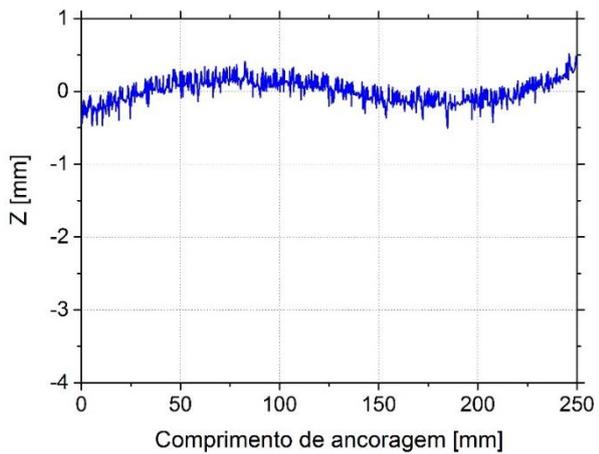
GR_Lb250_2



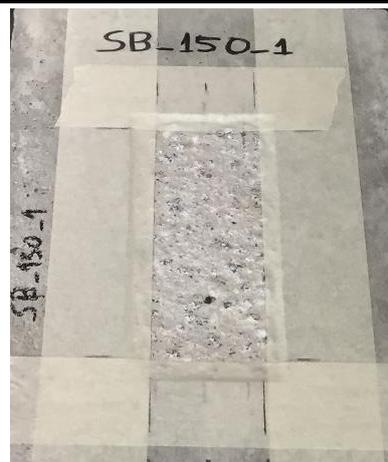
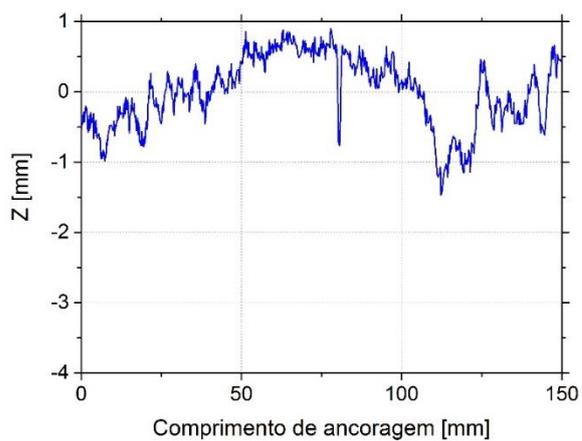
GR_Lb250_3



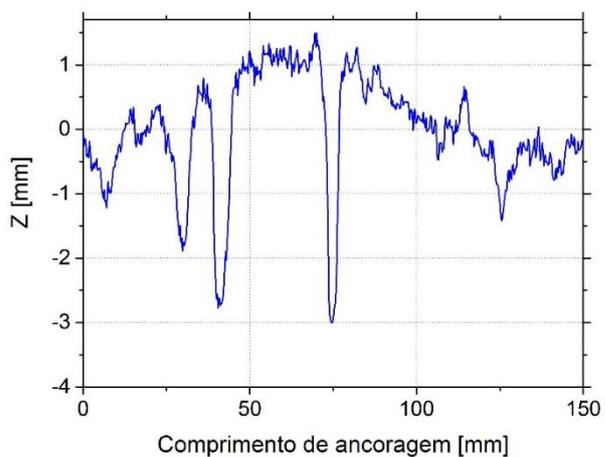
GR_Lb250_4



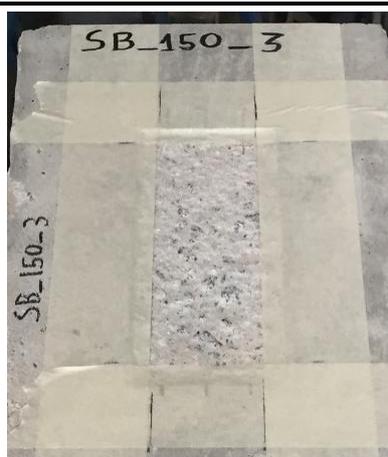
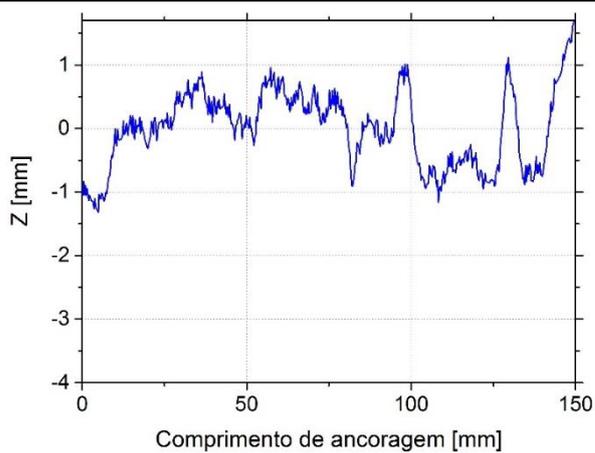
SB_Lb150_1



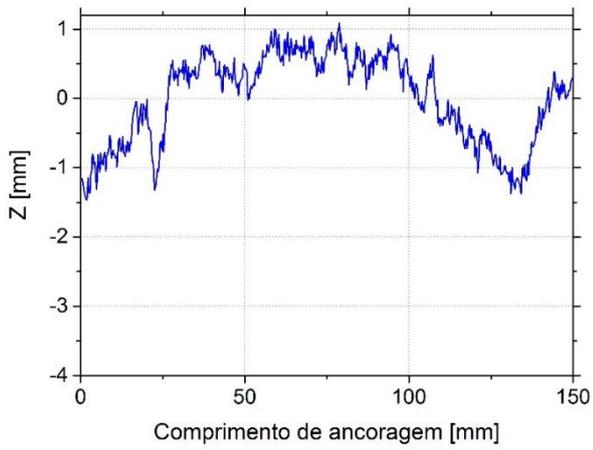
SB_Lb150_2



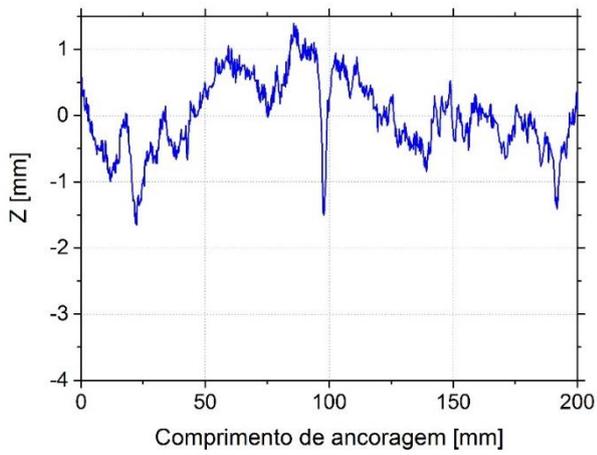
SB_Lb150_3



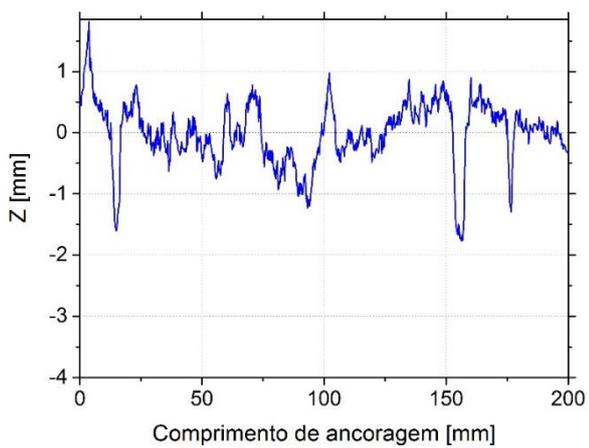
SB_Lb150_4



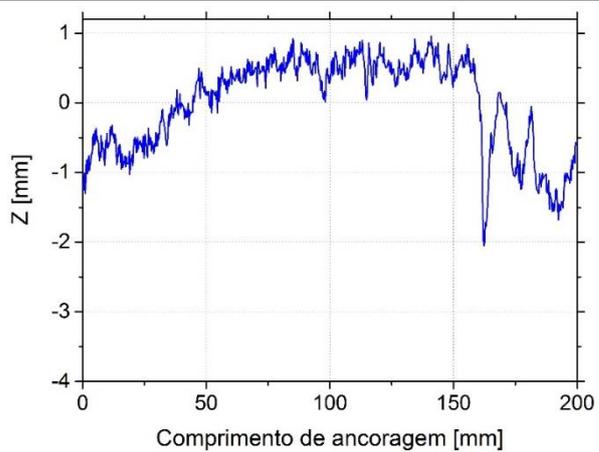
SB_Lb200_1



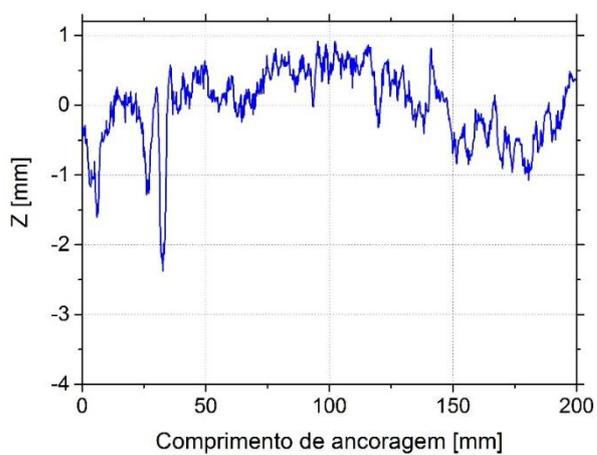
SB_Lb200_2



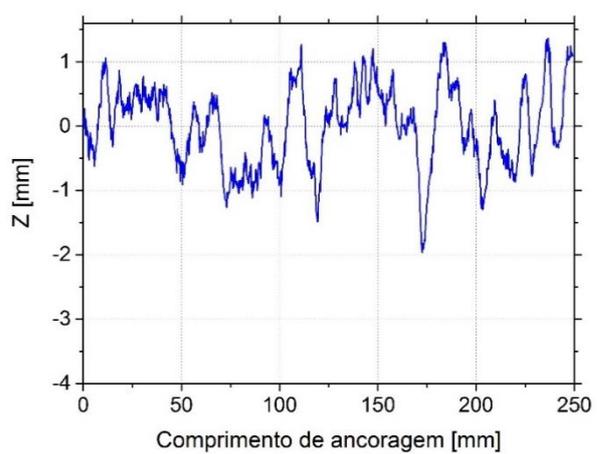
SB_Lb200_3



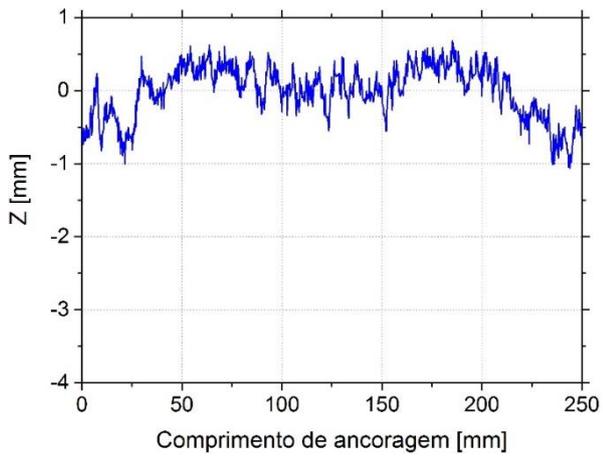
SB_Lb200_4



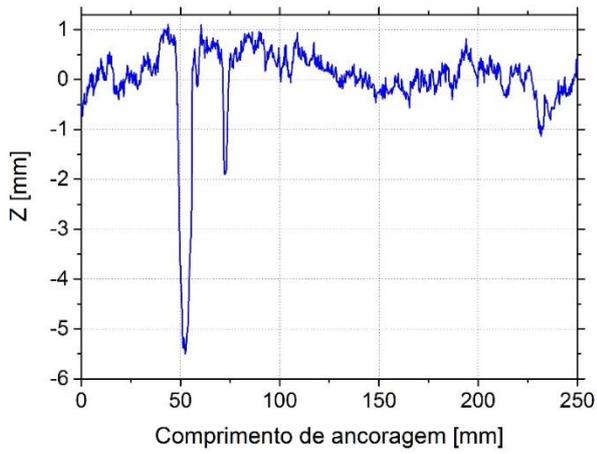
SB_Lb250_1



SB_Lb250_2



SB_Lb250_3



SB_Lb250_4

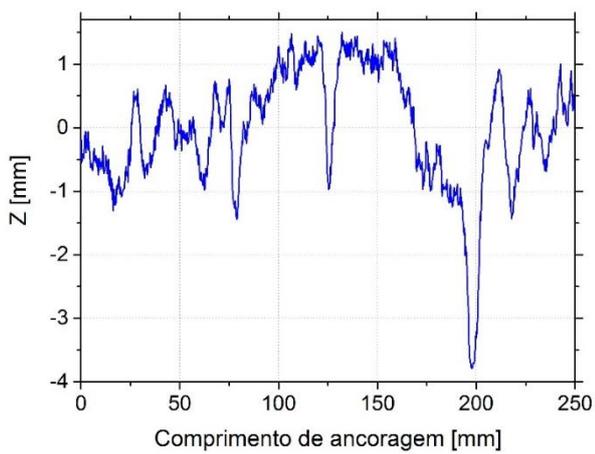


Tabela I.1 - Resultados da caracterização do nível de rugosidade nos provetes cujo tratamento superficial foi esmeril.

Provete	Tratamento superficial com esmeril (GR – <i>Grinding</i>)				
	Parâmetros de caracterização da rugosidade [mm]				
	R_m	R_q	R_v	R_p	R_t
GR_Lb150_1	0.178	0.344	-2.260	0.376	2.636
GR_Lb150_2	0.140	0.284	-2.877	0.363	3.241
GR_Lb150_3	0.136	0.294	-2.368	0.333	2.701
GR_Lb150_4	0.094	0.118	-0.325	0.349	0.674
Média	0.137	0.260	-1.958	0.355	2.313
GR_Lb200_1	0.119	0.162	-1.510	0.362	1.872
GR_Lb200_2	0.139	0.173	-0.574	0.440	1.014
GR_Lb200_3	0.118	0.216	-1.846	0.308	2.154
GR_Lb200_4	0.104	0.172	-1.258	0.337	1.595
Média	0.120	0.181	-1.297	0.362	1.659
GR_Lb250_1	0.170	0.375	-3.167	0.686	3.853
GR_Lb250_2	0.161	0.408	-3.383	0.346	3.728
GR_Lb250_3	0.195	0.369	-2.324	0.445	2.769
GR_Lb250_4	0.133	0.163	-0.507	0.513	1.020
Média	0.165	0.329	-2.345	0.498	2.843

Tabela I.2 - Resultados da caracterização do nível de rugosidade nos provetes cujo tratamento superficial foi jato de areia.

Provete	Tratamento superficial com jato de areia (SB – <i>Sand blasting</i>)				
	Parâmetros de caracterização da rugosidade [mm]				
	R_m	R_q	R_v	R_p	R_t
SB_Lb150_1	0.415	0.500	-1.466	0.903	2.369
SB_Lb150_2	0.671	0.885	-3.006	1.497	4.503
SB_Lb150_3	0.482	0.588	-1.318	1.757	3.074
SB_Lb150_4	0.562	0.647	-1.465	1.089	2.554
Média	0.533	0.655	-1.814	1.311	3.125
SB_Lb200_1	0.463	0.569	-1.655	1.396	3.050
SB_Lb200_2	0.391	0.519	-1.777	1.817	3.594
SB_Lb200_3	0.570	0.658	-2.052	0.961	3.013
SB_Lb200_4	0.416	0.535	-2.377	0.919	3.297
Média	0.460	0.570	-1.965	1.273	3.239
SB_Lb250_1	0.504	0.616	-1.967	1.367	3.334
SB_Lb250_2	0.286	0.354	-1.062	0.686	1.748
SB_Lb250_3	0.458	0.883	-5.502	1.108	6.609
SB_Lb250_4	0.714	0.912	-3.786	1.508	5.294
Média	0.491	0.691	-3.079	1.167	4.246

ANEXO II - Resultados dos ensaios de arranque direto

Tabela II.1 – Resultados obtidos nos ensaios de arranque direto dos provetes cujo tratamento superficial foi esmeril.

Provete	Tratamento superficial com esmeril (GR – <i>Grinding</i>)							MR
	$F_{l,max}$ [kN]	$S_{l,max}$ [mm]	$S_{f,max}$ [mm]	τ_{max} [MPa]	G_f [kN.mm]	f_{fd} [MPa]	f_{fd}/f_{fu} [%]	
GR_Lb150_1	24.2	0.40	0.01	3.2	4.99	403.8	18.2	DB/C
GR_Lb150_2	26.3	0.34	0.01	3.5	5.52	437.5	19.7	DB/C
GR_Lb150_3	22.8	0.31	0.01	3.0	4.77	380.2	17.1	DB/C
GR_Lb150_4	21.9	0.31	0.00	2.9	5.04	364.7	16.4	DB/C
Média	23.8	0.34	0.01	3.2	5.08	396.5	17.8	-
GR_Lb200_1	24.2	0.36	0.01	2.4	5.22	402.8	18.1	DB/C
GR_Lb200_2	25.2	0.27	0.01	2.5	5.98	419.8	18.9	DB/C
GR_Lb200_3	23.7	0.42	(¹)	2.4	5.25	394.7	17.8	DB/C
GR_Lb200_4	22.1	0.30	0.00	2.2	5.05	368.0	16.6	DB/C
Média	23.8	0.34	0.01	2.4	5.37	396.3	17.8	-
GR_Lb250_1	23.8	0.33	-	1.9	5.36	396.0	17.8	DB/C
GR_Lb250_2	29.7	0.47	-	2.4	5.79	494.8	22.3	DB/C
GR_Lb250_3	26.5	0.31	-	2.1	6.06	441.7	19.9	DB/C
GR_Lb250_4	27.3	0.30	-	2.2	6.34	454.5	20.5	DB/C
Média	26.8	0.35	-	2.1	5.89	446.8	20.1	-

Notas: DB/C = Rotura por destacamento do sistema EBR CFRP com remoção de uma camada de betão (rotura coesiva no betão); (¹) dificuldades de leitura por parte do sistema de instrumentação.

Tabela II.2 - Resultados obtidos nos ensaios de arranque direto dos provetes cujo tratamento superficial foi jato de areia.

Provete	Tratamento superficial com jato de areia (SB – Sand blasting)							
	$F_{l,max}$ [kN]	$s_{l,max}$ [mm]	$s_{f,max}$ [mm]	τ_{max} [MPa]	G_f [kN.mm]	f_{fd} [MPa]	f_{fd}/f_{fu} [%]	MR
SB_Lb150_1	26.5	0.32	0.01	3.5	6.01	441.8	19.9	DB/C
SB_Lb150_2	29.6	0.37	(2)	3.9	5.76	493.5	22.2	DB/C
SB_Lb150_3	28.0	0.29	0.02	3.7	5.59	466.0	21.0	DB/C
SB_Lb150_4	24.7	0.27	0.01	3.3	4.76 ⁽¹⁾	411.0	18.5	DB/C
Média	27.2	0.31	0.01	3.6	5.79	453.1	20.4	-
SB_Lb200_1	33.4	0.44	0.01	3.3	5.90	556.2	25.0	DB/C
SB_Lb200_2	32.4	0.43	0.01	3.2	6.22	540.7	24.3	DB/C
SB_Lb200_3	26.0	0.38	0.00	2.6	5.60	433.7	19.5	DB/C
SB_Lb200_4	29.0	0.37	0.01	2.9	5.98	482.7	21.7	DB/C
Média	30.2	0.41	0.01	3.0	5.92	503.3	22.6	-
SB_Lb250_1	31.8	0.38	-	2.5	6.11	529.2	23.8	DB/C
SB_Lb250_2	29.2	0.42	-	2.3	5.78	486.5	21.9	DB/C
SB_Lb250_3	30.4	0.63	-	2.4	6.25	506.0	22.8	DB/C
SB_Lb250_4	34.0	0.66	-	2.7	6.14	566.5	25.5	DB/C
Média	31.3	0.52	-	2.5	6.07	522.0	23.5	-

Notas: DB/C = Rotura por destacamento do sistema EBR CFRP com remoção de uma camada de betão (rotura coesiva no betão); ⁽¹⁾ valor calculado até ao valor máximo de deslizamento (s_l) experimentado, visto que não foi atingido um valor de 0.3 mm; ⁽²⁾ dificuldades de leitura por parte do sistema de instrumentação.

ANEXO III - Fotografias das superfícies de fratura ao nível da interface CFRP/betão, observadas após os ensaios de arranque direto

GR_Lb150_1



GR_Lb150_2



GR_Lb150_3



GR_Lb150_4



GR_Lb200_1



GR_Lb200_2



GR_Lb200_3



GR_Lb200_4



GR_Lb250_1



GR_Lb250_2



GR_Lb250_3



GR_Lb250_4



SB_Lb150_1



SB_Lb150_2



SB_Lb150_3



SB_Lb150_4



SB_Lb200_1



SB_Lb200_2



SB_Lb200_3



SB_Lb200_4



SB_Lb250_1



SB_Lb250_2



SB_Lb250_3



SB_Lb250_4



GR_Lb150_1



GR_Lb150_2



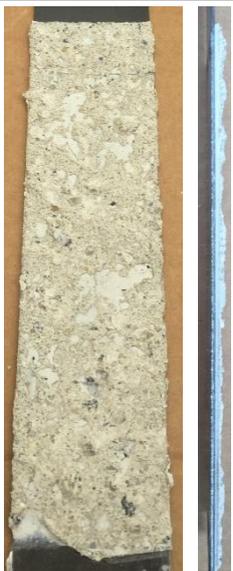
GR_Lb150_3



GR_Lb150_4



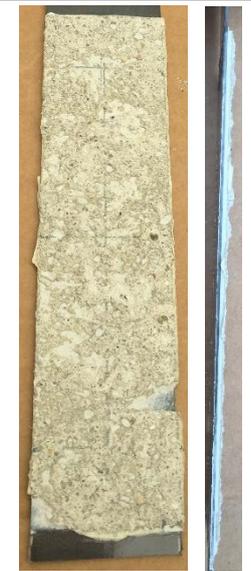
GR_Lb200_1



GR_Lb200_2



GR_Lb200_3



GR_Lb200_4



GR_Lb250_1



GR_Lb250_2



GR_Lb250_3



GR_Lb250_4



SB_Lb150_1



SB_Lb150_2



SB_Lb150_3



SB_Lb150_4



SB_Lb200_1



SB_Lb200_2



SB_Lb200_3



SB_Lb200_4



SB_Lb250_1



SB_Lb250_2



SB_Lb250_3



SB_Lb250_4

