



Maria Isabel Santos Borba
Licenciada em Ciências da Engenharia Civil

Comportamento da ligação CFRP/betão em estruturas de betão armado

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador: Prof. Doutor Hugo Emanuel Charrinho da
Costa Biscaia, FCT/UNL

Co-orientador: Prof. Doutor Carlos Manuel Chastre
Rodrigues, FCT/UNL

Presidente: Prof. Doutor Nuno da Costa Guerra
Arguente: Prof.^a Doutora Ildi Cismasiu
Vogal: Prof. Doutor Hugo Emanuel Charrinho da Costa Biscaia

Copyright Maria Isabel Santos Borba, FCT/UNL e UNL.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

A realização deste trabalho só foi possível com a ajuda de várias pessoas e entidades e, por isso, não posso deixar de lhes agradecer por todo o apoio prestado.

Em primeiro lugar, quero agradecer ao orientador desta dissertação, o professor Hugo Emanuel Biscaia, que com toda a sua calma, paciência e dedicação me acompanhou, ajudou e orientou em todo este trabalho. Agradeço por todos os conhecimentos transmitidos, por disponibilizar parte da bibliografia utilizada e por ter ajudado na forte componente experimental e na dedução de expressões que pareciam impossíveis.

Agradeço ao professor Carlos Chastre Rodrigues pelo apoio dado na realização da componente experimental deste trabalho, na disponibilização de material bibliográfico utilizado e na transmissão de conhecimentos sobre o tema em questão.

À empresa S&P Portugal pela disponibilização do laminado de CFRP e da resina utilizados na realização dos ensaios experimentais.

À professora Maria da Graça Almeida pela enorme paciência, ajuda e disponibilidade na aquisição e tratamento dos dados do método de Correlação de Imagem Digital.

Aos funcionários do Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Jorge Silvério e José Gaspar, pela paciência e grande ajuda prestada.

Aos bolsistas de investigação do Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, em especial ao Nuno Dinarte e ao André Almeida por toda a ajuda dada e calma transmitida no laboratório.

Aos colegas de curso e grandes amigos, especialmente à Cinderela Silva, Solange Cardoso, Micael Marcelino, Pedro Frade e David Cruz, por todo o apoio, ajuda, amizade e companhia ao longo da realização deste trabalho. Gostaria de agradecer ainda à Solange Cardoso pela ajuda na revisão do texto e à Cinderela Silva pela ajuda na dedução das equações do modelo analítico proposto neste trabalho.

Por último, agradeço à minha família, especialmente aos meus pais, por todo o apoio, incentivo, compreensão, ajuda, dedicação e amor.

Resumo

O presente trabalho centra-se no estudo de um sistema de reforço de estruturas de betão armado que se tem tornado bastante utilizado, o reforço com materiais compósitos. Os materiais compósitos utilizados neste estudo são polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP – *Carbon Fiber Reinforced Polymer*). A ligação deste compósito aos elementos de betão é feita através de resina, neste caso utilizou-se resina epoxídica.

Neste sistema de reforço é fulcral garantir que a ligação entre o compósito e o betão é a melhor possível e, por isso, no presente estudo estudou-se esta ligação através de ensaios experimentais de corte simples. Com o intuito de se perceber a influência do comprimento de laminado de CFRP colado ao substrato de betão, foram utilizados diferentes comprimentos colados nos ensaios experimentais. Utilizaram-se duas técnicas de reforço distintas, reforço com compósitos de CFRP colados exteriormente (EBR) e reforço com compósitos de CFRP colados numa ranhura feita no bloco de betão (NSM), com o intuito de se verificar a influência que a técnica de reforço pode ter na eficácia do sistema de reforço, percebendo para qual das técnicas se consegue obter uma melhor aderência entre o laminado de CFRP e o substrato de betão. Foram realizados 11 ensaios de corte simples para a técnica EBR e 8 ensaios de corte simples para a técnica NSM.

Neste estudo foi também encontrada uma solução analítica que consegue descrever o comportamento completo da interface entre o material compósito e o substrato de betão. Esta solução analítica foi encontrada a partir de um modelo *bond-slip* não-linear.

Os resultados experimentais obtidos foram analisados e o modelo analítico proposto foi validado com recurso a estudos presentes na literatura e aos resultados experimentais obtidos no presente estudo.

Abstract

This work focuses on the study of a strengthening-system widely used on reinforced concrete structures, the strengthening with fiber reinforced polymer (FRP) composites. The polymers used were carbon fiber reinforced polymer (CFRP), the bond between the composite and the concrete elements being made with an epoxy resin.

In this strengthening system it is crucial to guarantee the best bond between the composite and the concrete. Therefore, in this work, CFRP-to-concrete interfaces have been studied using single-lap shear tests. In order to analyze the influence of the bonded length on the final performance of the CFRP-to-concrete interfaces, various bonded lengths were assumed in the experiments. Two different strengthening-techniques were also analyzed, namely the Externally Bonded Reinforcement (EBR) and Near Surface Mounted (NSM), in order to test the influence of these strengthening techniques on the strengthening system performance and to check which of these techniques has the best adherence between the CFRP laminate and the concrete block. In total, 19 specimens were tested where, 11 of which on the strengthening of a concrete block using the EBR technique and the remaining 8 on a concrete block strengthened with the NSM technique.

In this study also a nonlinear theoretical solution that describes the full-range debonding behavior of CFRP-to-concrete interfaces was also proposed. This theoretical solution is based on a nonlinear bond-slip model commonly used in literature to describe the local behavior of CFRP-to-concrete interfaces.

The experimental results were analyzed and the theoretical model was validated using other studies available in the literature and the experimental results obtained in this study.

Palavras-chave

Compósitos CFRP;

Reforço estrutural;

Aderência;

Análise experimental;

Análise não-linear.

Keywords

CFRP Composites;

Structural reinforcement;

Bond;

Experimental analysis;

Non-linear analysis.

Índice de texto

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract.....	ix
Palavras-chave.....	xi
Keywords.....	xi
Índice de texto.....	xiii
Índice de figuras.....	xvii
Índice de tabelas.....	xxiii
Simbologia.....	xxv
Notações escalares latinas.....	xxv
Notações escalares gregas.....	xxvi
Abreviaturas.....	xxvii
Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1. Considerações gerais.....	1
1.2. Objetivos da dissertação.....	3
1.3. Estruturação da dissertação.....	4
Capítulo 2 - Reforço com compósitos de FRP.....	5
2.1. Aspectos gerais.....	5
2.2. Materiais.....	6
2.2.1. Materiais compósitos.....	6
2.2.2. Adesivo de ligação.....	7
2.3. Sistemas de reforço com compósitos de FRP.....	8
2.3.1. Sistema EBR (Externally Bonded Reinforcement).....	8
2.3.2. Sistema NSM (Near Surface Mounted).....	9
2.4. Preparação da superfície do substrato a reforçar com compósitos de FRP através da técnica EBR.....	11

2.5.	Efeito do comprimento ligado no desempenho do reforço com compósitos de FRP..	13
2.6.	Tipos de ensaios de arrancamento	18
2.6.1.	Ensaio de corte simples ou duplo.....	19
2.6.2.	Ensaio <i>pull-off</i> ou de arrancamento direto	20
2.6.3.	Ensaio de arrancamento	21
2.7.	Modos de rotura da interface	21
2.8.	Leis <i>bond-slip</i>	23
2.8.1.	Equações governativas da ligação FRP/betão	25
2.8.2.	Modelo proposto por Ueda e Dai [20].....	27
2.8.2.1.	NSM com laminados de secção retangular.....	30
2.8.2.2.	NSM com varões de secção circular	30
2.9.	Estudo do pós-colapso da interface FRP/betão	31
2.10.	Códigos e regulamentação.....	32
Capítulo 3 - Programa Experimental		33
3.1.	Aspetos gerais.....	33
3.2.	Caracterização dos materiais	34
3.2.1.	Fibras de carbono S&P 150/2000 (10x1,4) [38].....	34
3.2.2.	Resina S&P 220 [39].....	34
3.2.3.	Betão.....	35
3.3.	Aplicação do reforço	37
3.3.1.	Laminado CFRP pela técnica EBR	37
3.3.2.	Laminado CFRP pela técnica NSM	39
3.4.	Sistema de ensaio e instrumentação	42
3.4.1.	Técnica EBR.....	42
3.4.2.	Técnica NSM.....	46
Capítulo 4 - Ensaio de corte simples.....		49
4.1.	Resultados experimentais	49
4.1.1.	Técnica EBR.....	52

4.1.1.1.	Amostras com comprimento colado de 300 mm.....	52
4.1.1.2.	Amostras com comprimento colado de 150 mm.....	57
4.1.1.3.	Amostras com comprimento colado de 100 mm.....	60
4.1.1.4.	Amostras com comprimento colado de 50 mm.....	62
4.1.2.	Técnica NSM.....	65
4.1.2.1.	Amostra com comprimento colado de 200 mm	71
4.1.2.2.	Amostra com comprimento colado de 150 mm	73
4.1.2.3.	Amostra com comprimento colado de 100 mm	75
4.1.2.4.	Amostra com comprimento colado de 50 mm	77
4.1.3.	Método de Correlação de Imagem Digital	79
Capítulo 5 - Modelo analítico proposto.....		81
5.1.	Introdução.....	81
5.2.	Técnica EBR	82
5.3.	Técnica NSM.....	85
5.4.	Força máxima transmitida ao compósito FRP:	86
5.5.	Curvas força-deslizamento.....	87
5.6.	Forças transmitidas ao betão	90
5.7.	Validação do modelo analítico	92
5.7.1.	Técnica EBR	92
5.7.1.1.	Amostras com comprimento colado de 300 mm.....	93
5.7.1.2.	Amostras com comprimento colado de 150 mm.....	97
5.7.1.3.	Amostras com comprimento colado de 100 mm.....	101
5.7.1.4.	Amostras com comprimento colado de 50 mm.....	106
5.7.2.	Técnica NSM.....	110
5.7.2.1.	Amostras com comprimento colado de 200 mm.....	111
5.7.2.2.	Amostras com comprimento colado de 150 mm.....	115
5.7.2.3.	Amostras com comprimento colado de 100 mm.....	120
5.7.2.4.	Amostras com comprimento colado de 50 mm.....	124

5.7.3. Comparação entre as técnicas EBR e NSM.....	128
5.7.4. Comparação com o modelo analítico proposto por Ueda e Dai	131
5.7.5. Comparação com Biscaia et al.	132
Capítulo 6 - Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	135
6.1. Aspectos gerais.....	135
6.2. Conclusões.....	135
6.3. Desenvolvimentos futuros	137
Bibliografia.....	139

Índice de figuras

Figura 1.1 – Zonas com maior probabilidade de descolagem da interface. Adaptado de [45].	2
Figura 2.1 – Configuração do ensaio experimental [7].	11
Figura 2.2 - Configuração do ensaio experimental e dimensões do bloco de betão e do laminado CFRP. Adaptado de [31].	13
Figura 2.3 – Plano de falha para a técnica EBR e NSM. Adaptado de [43].	15
Figura 2.4 – Laminado colado a partir do lado da frente do bloco de betão: (a) distribuição de tensões de tração; (b) amostra depois do descolamento [34].	17
Figura 2.5 - Laminado colado a uma distância a partir do lado da frente do bloco de betão: (a) distribuição de tensões de tração; (b) amostra depois do descolamento [34].	18
Figura 2.6 - Ensaio de corte simples [5].	19
Figura 2.7 – Ensaio de corte duplo [5].	19
Figura 2.8 - Ensaio de corte direto para a técnica NSM: (a) configuração e dimensões do provete; (b) detalhe das peças utilizadas para colocar os LVDTs. Adaptado de [33].	20
Figura 2.9 - Ensaio pull-off [8].	21
Figura 2.10 - Ensaio de arrancamento [5].	21
Figura 2.11 - Roturas na técnica NSM: (a) rotura do betão e do adesivo ao longo de planos inclinados; (b) rotura de canto [22].	23
Figura 2.12 - Alguns modelos bond-slip encontrados na literatura [9].	24
Figura 2.13 – Pormenor das tensões instaladas na ligação do FRP ao substrato de betão.	26
Figura 2.14 - Configuração do ensaio [20].	28
Figura 2.15 - Relação típica extensão-deslizamento observada nos ensaios experimentais. Adaptado de [20].	28
Figura 2.16 – Curvas carga-deslizamento para o modelo proposto por Ferracuti [27], curva 1, e para uma lei <i>bond-slip</i> bi-linear [27], curva 2. Adaptado de [27].	31
Figura 3.1 - Distribuição da armadura dos blocos de betão.	35
Figura 3.2 – Modo de rotura dos cubos de betão.	36

Figura 3.3 - Preparação da superfície de betão: (a) aparelho utilizado; (b) preparação da superfície.	37
Figura 3.4 - Aspeto da superfície de betão depois de tratada.	38
Figura 3.5 – Preparação da resina.	39
Figura 3.6 – Aplicação do laminado: (a) aplicação da resina no substrato de betão; (b) aspeto final do laminado colado.	39
Figura 3.7 - Abertura dos rasgos.	40
Figura 3.8 – Aberturas feitas junto das extremidades.	41
Figura 3.9 – Aplicação do laminado.	41
Figura 3.10 - Aspeto final do reforço pela técnica NSM.....	42
Figura 3.11 – Configuração do ensaio experimental.	43
Figura 3.12 - Configuração final do ensaio.	44
Figura 3.13 - Pormenor da localização dos transdutores de deslizamento.	45
Figura 3.14 – Padrão aleatório criado ao longo do comprimento colado.	45
Figura 3.15 – Configuração do sistema de ensaio para a técnica NSM.	46
Figura 3.16 – Configuração do sistema de ensaio para a técnica NSM.	47
Figura 3.17 – Pormenor da localização dos transdutores de deslizamento.	47
Figura 4.1 – Tensões instaladas na ligação do compósito FRP ao substrato de betão.	50
Figura 4.2 – Pormenor da localização dos transdutores de deslizamento e dos extensómetros.	53
Figura 4.3 – Gráficos força vs. deslizamento, extensão vs. deslizamento e tensão de aderência vs. deslizamento para as amostras com comprimento colado de 300 mm.	54
Figura 4.4 – Gráfico tensão de aderência vs. deslizamento para os pontos 1, 2 e 3 do ensaio EBR_300_03.	55
Figura 4.5 – Modo de rotura do ensaio EBR_300_03 e identificação dos pontos 1 e 2.....	55
Figura 4.6 – Modo de rotura da amostra EBR_300_01.....	56
Figura 4.7 - Modo de rotura da amostra EBR_300_02.	56
Figura 4.8 - Modo de rotura da amostra EBR_300_03.	56
Figura 4.9 - Modo de rotura da amostra EBR_300_04.	57

Figura 4.10 - Gráficos força vs. deslizamento, extensão vs. deslizamento e tensão de aderência vs. deslizamento para a amostra EBR_150_01.....	58
Figura 4.11 - Gráfico tensão de aderência vs. deslizamento para o ponto 1, 2 e 3 do ensaio EBR_150_03.....	58
Figura 4.12 - Modo de rotura da amostra EBR_150_03 e localização dos pontos.	59
Figura 4.13 – Modo de rotura da amostra EBR_150_01.	59
Figura 4.14 - Modo de rotura da amostra EBR_150_02.....	60
Figura 4.15 - Gráficos força vs. deslizamento, extensão vs. deslizamento e tensão de aderência vs. deslizamento para as amostras com comprimento colado de 100 mm.....	61
Figura 4.16 - Modo de rotura da amostra EBR_100_01.	62
Figura 4.17 - Modo de rotura da amostra EBR_100_02.....	62
Figura 4.18 - Gráficos força vs. deslizamento, extensão vs. deslizamento e tensão de aderência vs. deslizamento para as amostras com comprimento colado de 50 mm.....	63
Figura 4.19 - Gráfico tensão de aderência vs. deslizamento para o ponto 1 e 2 do ensaio EBR_050_02.....	64
Figura 4.20 - Modo de rotura da amostra EBR_50_02 e localização dos pontos, 1 e 2.....	64
Figura 4.21 - Modo de rotura da amostra EBR_50_01.....	64
Figura 4.22 - Configuração experimental dos três primeiros ensaios pela técnica NSM.....	66
Figura 4.23 - Rotura do ensaio NSM_200_01.	67
Figura 4.24 - Rotura do ensaio NSM_050_01.	68
Figura 4.25 - Rotura do ensaio NSM_100_01	69
Figura 4.26 – Configuração final do sistema de ensaio para a técnica NSM.....	70
Figura 4.27 - Rotura do ensaio NSM_050_02.	70
Figura 4.28 - Localização dos transdutores de deslizamento, LVDT1 e LVDT2.....	71
Figura 4.29 – Gráfico força vs. deslizamento, extensão vs. deslizamento e tensão de aderência vs. deslizamento para o ensaio NSM_200_02.....	72
Figura 4.30 - Modo de rotura do ensaio NSM_200_02.	73
Figura 4.31 – Gráfico força vs. deslizamento, extensão vs. deslizamento e tensão de aderência vs. deslizamento para o ensaio NSM_150_01.....	74
Figura 4.32 – Modo de rotura do ensaio NSM_150_01.....	75

Figura 4.33 - Gráfico força vs. deslizamento, extensão vs. deslizamento e tensão de aderência vs. deslizamento para o ensaio NSM_100_02.	76
Figura 4.34 - Modo de rotura da amostra NSM_100_02.	77
Figura 4.35 – Gráfico força vs. deslizamento, extensão vs. deslizamento e tensão de aderência vs. deslizamento para o ensaio NSM_050_03.	78
Figura 4.36 - Modo de rotura da amostra NSM_050_03.	79
Figura 4.37 – Campos de deslizamentos obtidos pela Correlação de Imagem Digital (CID) para dois comprimentos: (a) 200 mm; e (b) 50 mm.	80
Figura 5.1 – Gráfico força máxima vs. comprimento colado.	88
Figura 5.2 - Carga <i>bond-slip</i> para os parâmetros referidos.	89
Figura 5.3 - Curvas força vs. deslizamento para a interface CFRP-Betão com um comprimento colado de: (a) 300 mm; e (b) 100 mm.	89
Figura 5.4 - Curvas <i>bond-slip</i> experimentais e analíticas para um comprimento colado de 300 mm.	93
Figura 5.5 – Curvas analíticas e experimentais: (a) força-deslizamento; (b) extensão-deslizamento; e (c) tensão de aderência-deslizamento.	94
Figura 5.6 – Curvas analítica tensão de aderência vs. deslizamento e força vs. deslizamento para um comprimento colado de 300 mm.	95
Figura 5.7 – Distribuição de deslizamento e extensões no FRP e tensões de aderência na interface ao longo do comprimento colado de 300 mm.	96
Figura 5.8 – Distribuição da força no betão ao longo do comprimento colado de 300 mm.	97
Figura 5.9 - Curvas analíticas e experimentais de força-deslizamento, extensão-deslizamento e tensão de aderência-deslizamento.	98
Figura 5.10 - Curvas analíticas tensão de aderência vs. deslizamento e força vs. deslizamento para um comprimento colado de 150 mm.	99
Figura 5.11 - Distribuição de deslizamento e extensões no FRP e tensões de aderência na interface ao longo do comprimento colado de 150 mm.	100
Figura 5.12 - Distribuição da força no betão ao longo do comprimento colado de 150 mm.	101
Figura 5.13 - Curvas analíticas e experimentais de força-deslizamento, extensão-deslizamento e tensão de aderência-deslizamento.	103

Figura 5.14 - Curvas analíticas tensão de aderência vs. deslizamento e força vs. deslizamento para um comprimento colado de 100 mm.	103
Figura 5.15 - Distribuição de deslizamento e extensões no FRP e tensões de aderência na interface ao longo do comprimento colado de 100 mm.	105
Figura 5.16 - Distribuição da força no betão ao longo do comprimento colado de 100 mm.	106
Figura 5.17 - Curvas analíticas e experimentais de força-deslizamento, extensão-deslizamento e tensão de aderência-deslizamento.	107
Figura 5.18 - Curvas analíticas tensão de aderência vs. deslizamento e força vs. deslizamento para um comprimento colado de 50 mm.	108
Figura 5.19 - Distribuição de deslizamento e extensões no FRP e tensões de aderência na interface ao longo do comprimento colado de 50 mm.	109
Figura 5.20 - Distribuição da força no betão ao longo do comprimento colado de 50 mm.	110
Figura 5.21 - Curvas <i>bond-slip</i> analíticas obtidas a técnica NSM.	111
Figura 5.22 - Curvas analíticas e experimentais de força-deslizamento, extensão-deslizamento e tensão de aderência-deslizamento.	112
Figura 5.23 – Curvas analíticas da tensão de aderência vs. deslizamento e força vs. deslizamento para um comprimento colado de 200 mm.	113
Figura 5.24 - Distribuição de deslizamento e extensões no FRP e tensões de aderência na interface ao longo do comprimento colado de 200 mm.	114
Figura 5.25 – Distribuição da força no substrato de betão ao longo do comprimento colado.	115
Figura 5.26 - Curvas analíticas e experimentais de força-deslizamento, extensão-deslizamento e tensão de aderência-deslizamento.	117
Figura 5.27 – Curvas analíticas tensão de aderência vs. deslizamento e força vs. deslizamento para um comprimento colado de 150 mm.	118
Figura 5.28 - Distribuição de deslizamento e extensões no FRP e tensões de aderência na interface ao longo do comprimento colado de 150 mm.	119
Figura 5.29 – Distribuição da força no substrato de betão ao longo do comprimento colado.	120
Figura 5.30 - Curvas analíticas e experimentais de força-deslizamento, extensão-deslizamento e tensão de aderência-deslizamento.	121
Figura 5.31 – Curvas analíticas tensão de aderência vs. deslizamento e força vs. deslizamento para um comprimento colado de 100 mm.	122

Figura 5.32 - Distribuição de deslizamento e extensões no FRP e tensões de aderência na interface ao longo do comprimento colado de 150 mm.	123
Figura 5.33 – Distribuição da força no substrato de betão ao longo do comprimento colado.	124
Figura 5.34 - Curvas analíticas e experimentais de força-deslizamento, extensão-deslizamento e tensão de aderência-deslizamento.	125
Figura 5.35 – Curvas analíticas tensão de aderência vs. deslizamento e força vs. deslizamento para um comprimento colado de 50 mm.	126
Figura 5.36 - Distribuição de deslizamento e extensões no FRP e tensões de aderência na interface ao longo do comprimento colado de 50 mm.	127
Figura 5.37 – Distribuição da força no substrato de betão ao longo do comprimento colado.	128
Figura 5.38 – Gráfico força máxima vs. comprimento ligado.....	129
Figura 5.39 - Gráfico deslizamento último na extremidade carregada vs. comprimento ligado...	130
Figura 5.40 - Curvas força vs. deslizamento: (a) comprimento colado de 300 mm; e (b) comprimento colado de 100 mm.	131
Figura 5.41 – Comparação do modelo analítico proposto com o modelo numérico [11] e com os resultados experimentais [10]. Adaptado de [37]......	133

Índice de tabelas

Tabela 3.1 – Tensões de rotura à compressão dos cubos de betão.....	36
Tabela 4.1 – Designação e características das amostras ensaiadas.	51
Tabela 4.2 - Resumo dos dados obtidos para os ensaios realizados pela técnica EBR.	53
Tabela 4.3 - Resumo dos dados obtidos para os ensaios realizados pela técnica NSM.	66

Simbologia

Notações escalares latinas

A	- Extensão máxima
A_f	- Área transversal de FRP
B	- Índice de rigidez
b_c	- Largura do bloco de betão
b_f	- Largura do laminado de FRP
d_f	- Espessura do plano de falha perpendicular à superfície de betão
d_p	- Espessura do plano de falha
E_c	- Módulo de elasticidade do betão
E_{cm}	- Módulo de elasticidade médio do betão
E_f	- Módulo de elasticidade do FRP
F	- Força aplicada ao compósito de FRP
f_c	- Tensão de rotura à compressão de provetes cilíndricos de betão
F_c	- Força transmitida ao substrato de betão
$f_{c,cub}$	- Tensão de rotura à compressão de provetes cúbicos de betão
f_{ck}	- Valor característico da tensão de rotura do betão à compressão
f_{cm}	- Valor médio da tensão de rotura do betão à compressão
f_{ctm}	- Tensão de rotura à tração média do betão
F_{max}	- Força máxima
G_f	- Energia de fratura
h_c	- Altura do bloco de betão
k_b	- Fator de geometria
k_c	- Fator do estado de compactação do betão
L_b	- Comprimento ligado

L_{eff}	- Comprimento de ligação efetivo
L_{per}	- Comprimento do plano de falha
n_p	- Constante de Popovics
s_{max}	- Deslizamento máximo
s_{ult}	- Deslizamento último
$s_{\text{ult}}(\text{CID})$	- Deslizamento último obtido pelo método de Correlação de Imagem Digital
$s_{\text{ult}}(\text{deflet.})$	- Deslizamento último obtido pelos transdutores de deslizamento
t_b	- Espessura do plano de falha
t_c	- Espessura do betão
t_f	- Espessura do FRP
T_g	- Temperatura de transição vítrea
t_r	- Espessura da resina
u_c	- Deslocamento do substrato de betão
u_f	- Deslocamento do FRP

Notações escalares gregas

\varnothing_f	Diâmetro do varão de FRP
ε_f	Extensão no compósito de FRP
ε_{max}	Extensão máxima
σ_c	Tensão normal do betão
σ_f	Tensão normal do compósito de FRP
τ_{max}	Tensão de aderência máxima
α	Fator de redução
β_L	Fator de redução
β_w	Fator geométrico

Abreviaturas

ACI	- American Concrete Institute
AFRP	- Aramid Fiber Reinforced Polymer
CFRP	- Carbon Fiber Reinforced Polymer
CID	- Correlação de Imagem Digital
EBR	- Externally Bonded Reinforcement
FCT	- Faculdade de Ciências e Tecnologia
fib	- Federation Internationale du Beton
FRP	- Fiber Reinforced Polymer
GFRP	- Glass Fiber Reinforced Polymer
NSM	- Near Surface Mounted Reinforcement
UNL	- Universidade Nova de Lisboa

Capítulo 1 - Introdução

1.1. Considerações gerais

Foi no período pós-guerra que as estruturas de betão armado se tornaram nas estruturas mais usuais no mundo da construção civil. Apesar da crescente utilização de outros materiais na conceção de estruturas, como o caso do aço, o betão continua a ser o material de eleição. No entanto, grande parte das estruturas de betão armado existentes já atingiram ou estarão perto de atingir o tempo de vida útil previsto inicialmente, encontrando-se já degradadas. Deste modo, torna-se fulcral o estudo de soluções adequadas de reforço de estruturas.

A necessidade de reforçar estruturas de betão armado pode dever-se a inúmeras razões: (i) quando é atingido o período de vida útil previsto; (ii) quando se detetam erros de execução/projeto; (iii) quando a função da estrutura se altera; (iv) quando a capacidade resistente da estrutura diminui devido a acidentes ou danificação do betão e/ou corrosão das armaduras; entre outras.

O reforço de estruturas pode ser feito por métodos mais tradicionais, como o reforço por: (i) encamisamento com betão armado que consiste em aumentar a secção dos elementos a reforçar com adição de betão e armaduras; (ii) reforço com chapas metálicas coladas; (iii) adição de perfis metálicos à estrutura a reforçar, alterando, ou não, o sistema estrutural. Entre as décadas de 1970 e 1990, o reforço de estruturas de betão armado era feito, principalmente, através do reforço com chapas de aço, pois além de ser económico, este método de reforço permite um aumento da resistência do elemento a reforçar. No entanto, este tipo de reforço apresenta limitações, salientando-se o seu elevado peso próprio, que provocava problemas a nível de transporte e de manuseamento, e a corrosão. Foi na década de 1980 que surgiram materiais compósitos no reforço de estruturas que viriam a tornar-se numa alternativa ao reforço com chapas de aço. Estes materiais compósitos são constituídos por fibras incorporadas numa matriz polimérica pelo que são designados por materiais compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras (FRP - *Fiber Reinforced Polymer*). O reforço com compósitos é realizado através da adição de FRP por colagem com resina epoxídica ao elemento a reforçar.

Ao contrário do reforço com aço, o reforço com compósitos de FRP é imune à corrosão, apresentam uma maior facilidade de manuseamento devido ao seu baixo peso próprio e não possuem limitações a nível de comprimentos disponíveis. Salienta-se também o fator estético, pois o reforço com compósitos de FRP permite preservar as características arquitetónicas dos edifícios. No entanto, ao contrário do aço, os compósitos de FRP têm um comportamento elástico linear até à rotura sem patamar de cedência, tendo assim um comportamento frágil. Têm sido feitos vários estudos sobre reforço de estruturas civis com compósitos de FRP de forma a avaliar o desempenho dessas estruturas durante o seu período de vida útil.

Dentro da vasta gama de fibras, a fibra mais utilizada nos compósitos para reforço de estruturas de betão armado é a fibra de carbono. As fibras de carbono são as mais utilizadas nesta área devido às suas características, como é o caso do seu elevado módulo de elasticidade e elevada resistência. Os compósitos constituídos por fibras de carbono são designados por CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*).

Nos últimos anos, tem vindo a ser estudado o comportamento de estruturas de betão armado reforçadas com compósitos de CFRP, a fim de se compreender como este sistema de reforço se comporta face às ações a que as estruturas estão sujeitas. Sabe-se que o sucesso do sistema de reforço com compósitos de FRP depende não só das características isoladas do material de reforço e do elemento a reforçar, mas também da boa aderência entre eles. Assim, torna-se fulcral estudar a ligação entre o betão e o compósito de FRP.

Este tipo de reforço é bastante utilizado no reforço de vigas à flexão e ao corte. Neste caso, é comum observar descolamentos prematuros do compósito de FRP nas zonas em que a viga está fendilhada ou nas extremidades (zona de apoio), como mostra a Figura 1.1.

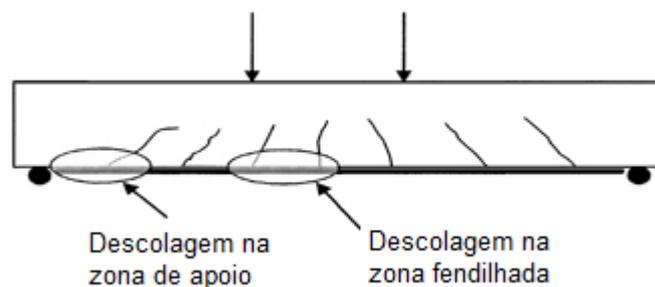


Figura 1.1 – Zonas com maior probabilidade de descolagem da interface. Adaptado de [45].

O presente estudo pretende alargar os conhecimentos sobre este tipo de reforço com compósito de FRP, através do estudo do comportamento da ligação do compósito de FRP ao substrato de betão junto das zonas de apoio. Este estudo será realizado no presente trabalho através da realização de ensaios de corte simples em blocos de betão reforçados com laminados de CFRP. Serão realizados

ensaios para duas técnicas de reforço com compósitos de CFRP distintas, uma técnica em que o laminado é colado exteriormente (EBR – *Externally Bonded Reinforcement*) e outra em que o laminado é introduzido e colado numa ranhura feita na superfície do bloco de betão (NSM – *Near Surface Mounted*).

Como atualmente não existem soluções analíticas exatas que consigam descrever o comportamento completo da interface, procurou-se uma solução analítica que descrevesse com rigor este comportamento. Assim, no presente estudo, apresenta-se uma solução analítica que estima o comportamento do descolamento completo de sistemas de reforço com compósitos de FRP.

1.2. Objetivos da dissertação

O presente trabalho tem como principal objetivo a realização de ensaios de corte simples em blocos de betão reforçados com laminados de CFRP, com o intuito de estudar a ligação entre os laminados e o substrato de betão. O trabalho em causa tem também como objetivo encontrar uma solução analítica que descreva adequadamente o comportamento completo do descolamento da interface entre o compósito de FRP e o substrato a reforçar.

A realização dos ensaios de corte simples teve lugar no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da FCT-UNL.

Pretende-se realizar ensaios de corte simples com laminados de CFRP para dois sistemas de reforço diferentes, sistema EBR (*Externally Bonded Reinforcement*) e sistema NSM (*Near Surface Mounted*), que serão descritos posteriormente. Para cada sistema, pretende-se variar o comprimento colado, de modo a observar a sua influência no comportamento do sistema de reforço.

Os objetivos do presente estudo podem agrupar-se da seguinte forma:

- Conceber um programa experimental que permita realizar os ensaios de corte simples para caracterização da aderência entre laminados de CFRP e betão.
- Estudar experimentalmente a influência que o comprimento colado tem no desempenho do sistema de reforço.
- Estudar experimentalmente a influência das duas técnicas de reforço (EBR e NSM) no desempenho da ligação CFRP/betão.
- Analisar os resultados obtidos experimentalmente.
- Encontrar soluções analíticas que descrevam o comportamento de descolamento completo da interface entre um compósito de FRP e o material a reforçar.
- Comparar os resultados experimentais com as curvas analíticas obtidas.

- Comparar o modelo analítico proposto com modelos analíticos e numéricos e resultados experimentais encontrados na literatura.

1.3. Estruturação da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos distintos, incluindo a introdução e a conclusão.

O capítulo 1 refere-se à introdução da dissertação, onde é feita uma breve introdução ao tema em estudo e onde são apresentados os objetivos e estruturação da presente dissertação.

O capítulo 2 apresenta o estado da arte sobre o tema em questão. Este capítulo é constituído por informação sobre o material de reforço utilizado no presente estudo, as diferentes técnicas de reforço com compósitos de CFRP que podem ser utilizadas, os tipos de preparação de superfícies existentes e a sua influência no comportamento do reforço e a influência do comprimento colado no comportamento do sistema de reforço. Apresenta-se também o comportamento da interface, os modos de rotura possíveis e as leis *bond-slip* que representam o comportamento local do reforço quando sujeito a cargas.

No capítulo 3 é descrito o sistema de ensaio e o seu funcionamento, a instrumentação utilizada e a caracterização dos materiais utilizados na componente experimental do presente trabalho.

No capítulo 4 é feita a apresentação dos resultados obtidos nos ensaios experimentais e a respetiva análise.

O capítulo 5 apresenta o modelo analítico proposto para descrever o comportamento completo de descolamento da interface FRP-substrato a reforçar. Neste capítulo é feita também a validação do modelo, comparando-o com os resultados experimentais obtidos no presente estudo e com resultados analíticos, numéricos e experimentais encontrados na literatura.

O capítulo 6 é referente a conclusões e desenvolvimentos futuros, em que são descritas as principais conclusões que podem ser retiradas do trabalho desenvolvido e são mostradas opções de trabalhos que poderão ser desenvolvidos futuramente.

Capítulo 2 - Reforço com compósitos de FRP

2.1. Aspectos gerais

A aplicação dos compósitos de FRP no campo de reforço de estruturas de betão armado tem vindo a aumentar, uma vez que estes materiais apresentam enormes vantagens, nomeadamente no que toca à facilidade de aplicação, durabilidade, alta resistência à tração, grande capacidade à deformação, baixo peso específico e grande resistência à corrosão e aos agentes ambientais. Este tipo de reforço é utilizado no reforço de estruturas de forma a aumentar a rigidez e a capacidade de carga da estrutura de betão armado. No entanto, podem ser identificadas algumas desvantagens neste tipo de reforço, como a sua rotura frágil e o seu mau desempenho ao fogo. As altas temperaturas provocam um descolamento precoce do compósito de FRP do substrato, pois quando a matriz polimérica, responsável por ligar o compósito de FRP ao substrato, atinge a sua temperatura de transição vítrea, T_g , perde as suas propriedades mecânicas. A técnica EBR (*Externally Bonded Reinforcement*) apresenta, normalmente, um modo de rotura prematuro que está associado à separação do compósito do substrato para 40% a 60% da tensão de rotura do compósito de FRP. Isto pode ser visto como uma desvantagem, uma vez que a resistência do compósito não é atingida. Vários estudos têm tentado encontrar soluções para melhorar estes problemas observados aquando do uso da técnica EBR, por exemplo [7, 11, 21, 40, 41], os quais analisam uma outra técnica de colagem alternativa à técnica EBR, a técnica NSM (*Near Surface Mounted*).

O descolamento prematuro do compósitos de FRP do substrato a reforçar é um dos maiores problemas deste sistema de reforço e, por isso, tem sido bastante estudado. No entanto, muitos dos estudos existentes permitem apenas prever o comportamento do descolamento da interface até ao momento do colapso. Atualmente não existem soluções analíticas exatas que consigam descrever, com rigor, o comportamento completo de descolamento da interface entre o compósito de FRP e o substrato a reforçar. Mais recentemente, vários autores têm estudado o pós-colapso da interface

entre o compósito de FRP e o material a reforçar através de modelos numéricos. Diversos autores, por exemplo [14, 18, 28, 44], constataram, no processo de descolamento do compósito de FRP do substrato, a existência de um fenômeno de *snap-back*. Este fenômeno ocorre para comprimentos colados longos, ou seja, para comprimentos colados maiores que o comprimento de ligação efetivo. Note-se que o comprimento de ligação efetivo corresponde ao comprimento para o qual um aumento da sua extensão não provoca um aumento na resistência do sistema.

Neste capítulo apresenta-se um breve estado do conhecimento sobre o comportamento da ligação entre compósitos de FRP e betão. São abordados alguns parâmetros que podem influenciar o desempenho desta ligação, tais como, a técnica de colagem dos compósitos de FRP ao substrato de betão, o tipo de preparação da superfície de betão e o comprimento colado de compósito de FRP. Neste capítulo apresentam-se também os ensaios experimentais mais utilizados para testar a ligação entre o compósito de FRP e o substrato e os modos de rotura mais comuns. Apresentam-se ainda equações e modelos que tentam simular o comportamento da interface entre os compósitos de FRP e o substrato de betão.

2.2. Materiais

2.2.1. Materiais compósitos

Os materiais compósitos são constituídos por dois ou mais componentes com o intuito de se obter características que nenhum dos componentes apresenta isoladamente. Os polímeros reforçados com fibras (FRP - *Fiber Reinforced Polymer*) são constituídos por dois componentes: uma fibra, que é o material de reforço que confere resistência e rigidez ao compósito, e uma matriz, que confere estrutura, protegendo as fibras do meio envolvente e garantindo continuidade e distribuição adequada de esforços. A matriz deve ser ainda responsável pelo correto posicionamento das fibras.

O comportamento do compósito de FRP é amplamente afetado pelas propriedades dos materiais que o constituem, pela quantidade de cada componente, pela disposição das fibras, pela distribuição da matriz, pela interação entre os materiais e pelo processo de fabrico. Normalmente, a resistência dos compósitos de FRP é regulada pelas propriedades das fibras, visto que a resistência e a rigidez das fibras são muito superiores às das matrizes. São as fibras as principais responsáveis pela elevada resistência à tração do FRP.

As matrizes são constituídas maioritariamente por resina. No entanto, estas podem conter aditivos e material de enchimento. As matrizes podem ser constituídas por vários tipos de resinas, tais como, epoxídicas, poliéster, viniléster e fenólica. Normalmente, no reforço de estruturas os

materiais constituintes das matrizes dos compósitos são resinas epoxídicas, uma vez que possuem elevada viscosidade, alta aderência, elevada durabilidade, baixa retração e cura demorada.

As fibras mais utilizadas na construção civil são as fibras de carbono, de vidro e de aramida. Os respectivos compósitos de reforço são denominados por CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*), GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) e AFRP (*Aramid Fiber Reinforced Polymer*). É de notar que cada tipo de fibra possui características mecânicas diferentes e a escolha do tipo de fibras depende das características pretendidas para a estrutura a reforçar.

Devido a razões económicas as fibras de carbono e de vidro têm sido as mais utilizadas e mais estudadas. As fibras de carbono têm mostrado que são as que melhor se ajustam às necessidades exigidas pelo reforço por colagem de estruturas de betão armado, devido à sua elevada resistência à tração, ao valor elevado do seu módulo de elasticidade e ao seu bom comportamento à fadiga.

Os compósitos de FRP apresentam-se em vários formatos, podendo ser na forma de laminados, tecidos ou varões. Os laminados são a forma de comercialização de FRP mais usada na construção e são normalmente utilizados para resolver problemas de tração. Apresentam espessuras bastante pequenas, de 1 a 2,4 mm.

2.2.2. Adesivo de ligação

Para além de se escolher o compósito de FRP a utilizar, tem de se escolher também o adesivo responsável pela colagem do compósito de FRP ao substrato a reforçar. Este adesivo é responsável por assegurar a ligação do compósito ao substrato de betão permitindo a transferência de tensões entre os materiais. Com esta ligação espera-se que o betão e o laminado funcionem em conjunto quando solicitados.

Tal como no caso da matriz, o tipo de adesivo mais usual é o adesivo do tipo epoxídico. Estes adesivos são compostos por dois componentes: a resina epoxídica pura e o endurecedor. Este último acelera o processo de endurecimento da resina. Para se obter uma boa resina, estes dois componentes devem ser misturados nas proporções adequadas e em conformidade com o preconizado pelo fabricante.

Para o adesivo ser eficiente na sua função é necessário que ele seja aplicado adequadamente, tendo em conta as temperaturas de cura, a humidade, a técnica de aplicação e a preparação da superfície de betão.

A espessura da camada de adesivo é um parâmetro muito importante, não devendo ser superior a 3 mm, de modo a facilitar o endurecimento no interior da resina.

Dai et al. [19] realizaram ensaio de corte simples para os quais fizeram variar a rigidez do compósito de FRP e o tipo de adesivo, de forma a determinar qual destes fatores mais influencia a qualidade da aderência entre o compósito de FRP e o betão. Utilizaram quatro tipos de adesivos com propriedades mecânicas diferentes e três tipos de laminados de FRP: laminado de carbono (CFRP); laminado de aramida (AFRP); e laminado de Vidro (GFRP).

Concluíram que o tipo de adesivo é o parâmetro que mais influencia a aderência entre o compósito de FRP e o substrato de betão. Dai et al. [19] constaram que tanto o módulo de elasticidade do adesivo como a espessura do mesmo afetam as propriedades da aderência e, por isso, as propriedades da aderência devem ser quantificadas usando a rigidez de corte do adesivo que é dada pela relação entre o módulo de elasticidade e a espessura.

Dai et al [19] concluíram que a aderência é tanto melhor quanto menor for a rigidez de corte do adesivo, ou seja, utilizar adesivos mais macios aumenta a força da ligação.

2.3. Sistemas de reforço com compósitos de FRP

Os compósitos de FRP têm sido utilizados em diferentes configurações e técnicas com o intuito de se utilizar o material de forma mais eficaz e garantindo, ao mesmo tempo, um longo período de vida útil do sistema de reforço. Neste trabalho, faz-se referência às técnicas de reforço por colagem, *Externally Bonded Reinforcement* (EBR), em que o compósito de FRP é colado exteriormente ao substrato de betão, e *Near Surface Mounted Reinforcement* (NSM), em que o compósito de FRP é colado num rasgo previamente feito numa face da superfície de betão.

2.3.1. Sistema EBR (Externally Bonded Reinforcement)

O sistema EBR, reforço por colagem exterior, consiste na colagem de laminado de FRP ao substrato de betão através de uma resina, vulgarmente epoxídica.

Para ser garantida uma ligação adequada do FRP ao betão é necessário que a superfície do substrato de betão em que será aplicado o FRP esteja limpa e com a rugosidade e homogeneidade adequadas [6].

As maiores preocupações a ter neste sistema de reforço com FRP residem na preparação adequada e limpeza da superfície a reforçar bem como a preparação e aplicação adequadas do adesivo de colagem. A preparação da superfície é, de facto, muito importante, pois permite criar uma rugosidade que permite aumentar a aderência entre a resina e o substrato de betão. Mais à frente, os métodos de preparação de superfície serão explicados de forma mais detalhada.

Esta técnica é a mais usual no reforço de estruturas com compósitos de FRP. Comparativamente à técnica NSM, a técnica EBR possui uma execução mais rápida e simples. O facto de o FRP ser colado pelo exterior do betão pode ser uma desvantagem quando comparado com a técnica NSM, uma vez que o reforço fica exposto aos agentes ambientais agressivos, havendo maior possibilidade de degradação. Outra desvantagem está nos modos de rotura frágeis que se observam em estruturas exteriormente reforçadas com compósitos de FRP. Estas roturas não estão geralmente associadas à rotura do compósito de FRP mas sim ao processo de descolamento deste material ao substrato. Inclusivamente, nestas ocasiões as extensões alcançadas pelo FRP ficam muito longe do seu valor de rotura o que indica que as propriedades mecânicas do FRP não são totalmente aproveitadas.

2.3.2. Sistema NSM (Near Surface Mounted)

A técnica NSM consiste na abertura de rasgos nas faces de um elemento de betão armado, com uma profundidade menor que a do recobrimento do betão, e colagem do FRP nessa ranhura. Nesta técnica, o compósito fica melhor protegido em termos mecânicos e químicos no interior do betão.

Esta técnica surgiu como tentativa de resolução de alguns problemas associados à técnica EBR, como por exemplo, o risco de rotura prematura do sistema. No entanto, esta técnica não é completamente nova, pois em 1940 foi utilizada no reforço de estruturas de betão com varões de aço. A vantagem de utilizar compósitos de FRP em vez de aço é principalmente devido à maior resistência à corrosão. O conhecimento sobre esta técnica ainda é bastante limitado comparativamente com o da técnica EBR, pelo que mais investigação nesta área precisa de ser feita.

Nesta técnica podem ser utilizadas várias formas de FRP, podendo utilizar-se laminados ou varões. Com o intuito de aumentar a aderência entre o compósito e o adesivo, os varões podem possuir nervuras ou superfícies rugosas.

Esta técnica não necessita de uma preparação de superfície do substrato de betão tão específica como no caso da técnica EBR, devendo apenas limpar-se o rasgo que foi previamente aberto. Os rasgos devem ter uma largura de 3 a 5 mm, por forma a evitar espessuras de resina exageradas.

Comparando a técnica EBR com a NSM, verifica-se que o reforço com a técnica NSM permite uma maior resistência ao descolamento e uma maior proteção do compósito a nível térmico, ao fogo, aos agentes ambientais, ao vandalismo e aos impactos. A técnica NSM possui uma maior superfície de contacto/aderência, aumentando a capacidade de ligação comparativamente à técnica EBR, sendo necessário uma força maior para descolar o FRP da superfície colada. A aplicação do sistema NSM reduz o impacto visual que as técnicas de reforço geralmente introduzem nas

estruturas, fator aliás, muitas vezes considerado importante. Como esta técnica utiliza o betão de recobrimento e não o betão que se encontra à superfície, existe uma maior probabilidade do betão apresentar uma melhor qualidade. Tendo em conta as vantagens enumeradas anteriormente pode referir-se que a técnica NSM poderá proporcionar um maior tempo de vida útil do sistema de reforço. Assim, esta técnica tem vindo a mostrar bastante eficácia no reforço de estruturas de betão armado, podendo ser uma alternativa viável à técnica de reforço por colagem de FRP mais corrente, a técnica EBR.

No entanto, nesta técnica ainda persistem algumas limitações, são exemplos disso, a profundidade do rasgo ser limitada pela espessura do recobrimento do betão e não haver regulamentação específica como no caso da técnica EBR, que possui orientações preconizadas pelo ACI-440 [1] e pelo boletim 14 da fib [29].

Vários estudos têm sido feitos com o intuito de comparar as duas técnicas de colagem do FRP. El-Hacha e Rizkalla [25] apresentaram um trabalho com resultados experimentais para vigas de betão com secção em T reforçadas à flexão com compósitos de CFRP e GFRP, reforçadas através das duas técnicas: NSM e EBR. No caso da técnica EBR foram utilizados laminados de compósito, enquanto na técnica NSM foram utilizados varões e laminados de compósito. Os resultados dos ensaios indicam que a utilização da técnica NSM com varões e laminados aumenta a capacidade de carga dos elementos reforçados comparativamente à técnica EBR. A técnica NSM conseguiu ainda retardar ou evitar a rotura precoce do sistema. Verificou-se também que a técnica NSM com laminados obteve melhores resultados do que a técnica NSM com varões. Na técnica NSM com laminados houve um aproveitamento máximo do compósito, enquanto na técnica NSM com varões observou-se sempre uma rotura prematura do sistema. Esta diferença de comportamento explica-se pelo facto da área de colagem do varão de compósito ser mais baixa do que no caso dos laminados e também pelo facto da zona de ligação ao betão ser mais uniforme no caso dos laminados.

Bilotta et al. [7] apresentaram resultados de ensaios experimentais com base em ensaios de corte simples, com o intuito de estudar o comportamento da ligação de elementos de betão reforçados com FRP utilizando duas técnicas de reforço distintas, NSM e EBR. Estes ensaios foram realizados recorrendo a blocos de betão com um comprimento de 400 mm, uma largura de 160 mm e uma altura de 200 mm. A Figura 2.1 mostra a configuração dos ensaios realizados em [7]. Os resultados obtidos indicaram que o sistema NSM é uma boa alternativa ao sistema EBR, pois permite que a descolagem seja adiada, fazendo com que a resistência à tração do compósito seja melhor explorada. Verificou-se também que a técnica NSM apresentou um aumento na sua capacidade de deformação no momento da rotura, o que indica que esta técnica é mais eficaz, promovendo roturas mais dúcteis. Estas conclusões indicam que o reforço de elementos de betão

com a técnica NSM é uma alternativa bastante interessante em relação ao reforço com a técnica EBR.

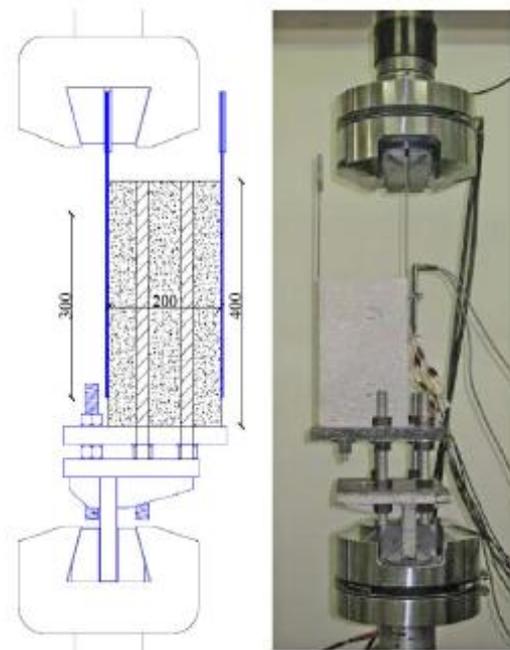


Figura 2.1 – Configuração do ensaio experimental [7].

2.4. Preparação da superfície do substrato a reforçar com compósitos de FRP através da técnica EBR

Como o sucesso do reforço com compósitos de FRP depende, em grande parte, da adequada ligação do sistema de reforço ao substrato de betão, é fulcral garantir que a superfície de betão esteja livre de sujidade, degradação, fissuração, corrosão ou armaduras expostas. Deste modo, a superfície deve ser limpa e preparada retirando a camada superficial do betão que estará em contacto com a resina, tornando a superfície livre de imperfeições e suficientemente rugosa. É de notar que a adequada preparação da superfície influencia não só o comportamento, no imediato, da ligação FRP/betão, mas também a longo prazo melhorando a durabilidade do sistema de reforço [23].

A escolha da rugosidade adequada proporciona uma melhor aderência do betão à resina de ligação, aumentando a resistência da ligação FRP/betão.

É necessário garantir que a rugosidade fique uniforme, o que por vezes não é uma tarefa fácil, pois depende da habilidade e da experiência do técnico que executa este procedimento. Ueda e Dai [45] constataram que a grande dispersão de resultados experimentais obtidos se deveu a diferentes condições de preparação de superfície.

Usualmente, a superfície de betão é preparada por intermédio de jato de areia e/ou de água ou esmerilagem. Normalmente, o método de preparação de superfície mais comum quando se pretende colar um laminado é o jato de areia e/ou água. O jato de areia e/ou água é um método de preparação de superfície abrasivo, que consiste em propulsionar a areia ou água a alta velocidade contra a superfície, removendo uma pequena camada de betão, obtendo-se assim uma superfície mais rugosa do que a inicial.

Iovinella et al. [32] analisaram o efeito que o tipo de preparação de superfície tem no desempenho da ligação entre o compósito de FRP e o elemento a reforçar. Neste estudo foram realizados ensaios experimentais em que uma série de blocos de betão foram preparados com diferentes tratamentos de superfície antes da aplicação do reforço. Foram também realizados ensaios em blocos de betão sem qualquer tratamento de superfície. Os quatro métodos de preparação de superfície utilizados foram: (i) *brushing*, que consiste em escovar a superfície de betão com um cabo de aço trançado ligado a um disco rotativo; (ii) esmerilagem, que consiste em remover a camada superior do recobrimento do betão com o auxílio de uma roda de pedra; (iii) *bush-hammering*, que consiste em aplicar na superfície de betão uma série de impactos múltiplos, com ângulos diferentes, utilizando uma ponta metálica; (iv) jato de areia, já explicado anteriormente.

Os resultados experimentais de Iovinella et al. [32] comprovaram que, de entre os métodos de preparação de superfície analisados, o jato de areia confere maior rugosidade e homogeneidade à superfície de betão. Percebe-se também dos ensaios experimentais Iovinella et al. [32] observados que o tipo de descolamento não é alterado pelo tipo de preparação de superfície. Os resultados de Iovinella et al. [32] mostraram que a resistência da ligação e a lei da interface são bastante afetadas pelo tipo de preparação de superfície. As técnicas de *brush-hammering* e o jato de areia são as que conferem maior resistência à ligação FRP/betão, aumentando a resistência em, respetivamente, cerca de 30 e 50%, quando comparado com a resistência da ligação CFRP/betão das amostras cuja preparação da superfície foi inexistente. Através da comparação da quantidade de betão aderente ao FRP após o descolamento, constatou-se que a técnica com maior rugosidade, o jato de areia, ficou associada a uma maior quantidade de betão aderente ao FRP. Iovinella et al. [32] verificaram também que o jato de areia foi o único tratamento capaz de aumentar substancialmente a força de ligação, levando a um melhor comportamento da interface FRP-Betão. Ou seja, o jato de areia é o tratamento que provoca o maior aumento da capacidade de ligação do FRP ao betão.

2.5. Efeito do comprimento ligado no desempenho do reforço com compósitos de FRP

A força de rotura para o descolamento aumenta com o aumento do comprimento ligado até um determinado comprimento, a que se chama comprimento efetivo da ligação. Por outras palavras, o comprimento efetivo da ligação é o comprimento para além do qual a resistência da ligação não aumenta. Assim, conhecer o valor do comprimento efetivo da ligação é muito importante, pois permite evitar, por exemplo, desperdício de material, e dimensionar este tipo de ligação de forma mais precisa.

A influência que o comprimento efetivo da ligação tem no comportamento do reforço tem sido bastante estudada. Hosseini et al. [31] estudaram vários modelos existentes na literatura para estimar o comprimento efetivo da ligação recorrendo a ensaios de corte simples. Os modelos analisados estão preconizados no ACI 440-2R [1], boletim 14 da fib [29], e HB 305 [30]. A Figura 2.2 apresenta a configuração dos ensaios de corte simples, adaptado de [31].

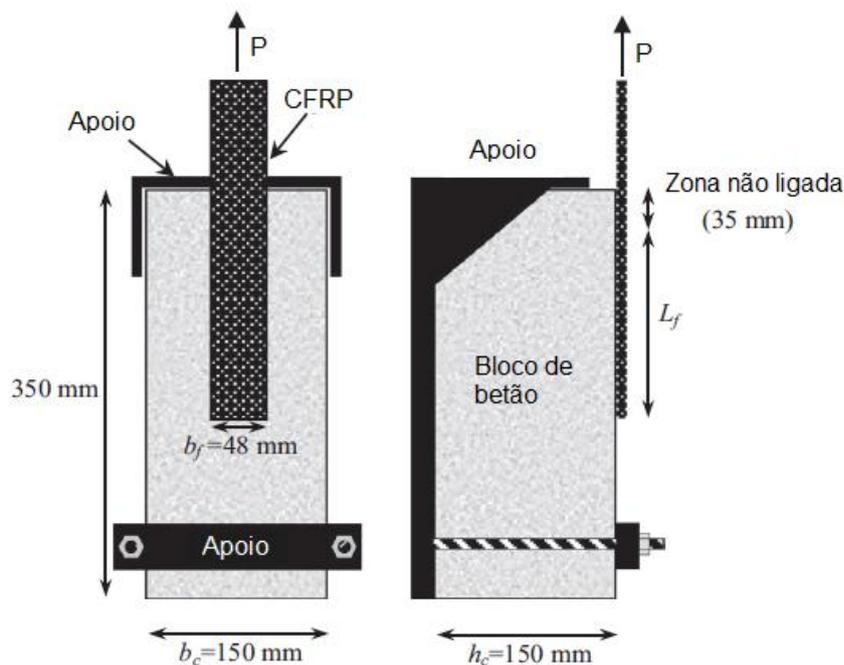


Figura 2.2 - Configuração do ensaio experimental e dimensões do bloco de betão e do laminado CFRP. Adaptado de [31].

Para a determinação da força de rotura o boletim 14 da fib [29] propõe a expressão seguinte:

$$F_{max} = \alpha c_1 k_c k_b b_f \sqrt{E_f t_f f_{ctm}} \quad (2.1)$$

onde F_{max} é a força máxima; b_f , t_f e E_f representam a largura, a espessura e o módulo de elasticidade do compósito de FRP, respectivamente; f_{cm} é a resistência à tração média de betão; α é um fator de redução, aproximadamente igual a 0,9; c_1 é obtido através de calibração com resultados experimentais, sendo que para laminados de CFRP c_1 é igual a 0,64 [29]; k_c é um fator que representa o estado de compactação do betão, geralmente pode ser assumido como sendo igual a 1,0; e k_b é um fator de geometria dado por:

$$k_b = 1.06 \sqrt{\frac{2 - (b_f/b_c)}{1 + (b_f/400)}} \geq 1.0 \quad (2.2)$$

onde b_c é a largura do compósito de FRP.

O comprimento efetivo da ligação, de acordo ainda com o boletim 14 da fib [29], pode ser calculado de acordo com:

$$L_{eff} = \sqrt{\frac{E_f t_f}{c_2 f_{ctm}}} \quad (2.3)$$

onde L_{eff} é o comprimento efetivo da ligação; c_2 é obtido através de calibração com resultados experimentais, sendo que para os laminados de CFRP c_2 é igual a 2,0 [29].

Nos casos em que o comprimento de colagem é inferior ao comprimento efetivo, o boletim 14 da fib [29] propõe o uso da expressão:

$$F_{(L_b < L_{eff})} = \frac{L_b}{L_{eff}} \left(2 - \frac{L_b}{L_{eff}} \right) F_{max} \quad (2.4)$$

onde L_b é o comprimento de colagem e $F_{(L_b < L_{eff})}$ é a força máxima obtida quando o comprimento de colagem é inferior ao comprimento efetivo.

O modelo de Chen e Teng [17] adotado no ACI 440-2R [1] e no HB 305 [30] propõe, para determinar a força máxima de ligação FRP/betão, a expressão:

$$F_{max} = \alpha \beta_w \beta_L b_f L_{eff} \sqrt{f_c} \quad (2.5)$$

onde f_c é a resistência à compressão cilíndrica do betão; α é igual a 0,427; β_L é o fator de redução, determinado de acordo com a equação (2.6); e β_w é o fator geométrico definido pela equação (2.7).

$$\beta_L = \begin{cases} \sin \frac{\pi}{2} \frac{L_b}{L_{eff}} & , L_b < L_{eff} \\ 1.0 & , L_b \geq L_{eff} \end{cases} \quad (2.6)$$

e

$$\beta_w = \sqrt{\frac{2 - b_f/b_c}{1 + b_f/b_c}} \quad (2.7)$$

Para a determinação do comprimento efetivo, ainda para o modelo de Chen e Teng [17] pode-se adotar:

$$L_{eff} = \sqrt{\frac{E_f t_f}{\sqrt{f_c}}} \quad (2.8)$$

Por outro lado, a determinação da força máxima pelo modelo de Seracino et al. [43] adotado no HB 305 [30] baseia-se na expressão:

$$F_{max} = 0.85 \left(\frac{d_p}{b_p} \right)^{0.25} f_c^{0.33} \sqrt{L_{per} E_f A_f} \quad (2.9)$$

onde A_f é a área transversal do compósito de FRP; d_p e t_b são as espessuras do plano de falha (veja-se a Figura 2.3), o valor sugerido para sistemas EBR é de 1 mm; b_p é a largura do plano de falha; e L_{per} é o perímetro do plano de falha de descolamento, que pode ser assumido como $2d_p + b_p$.

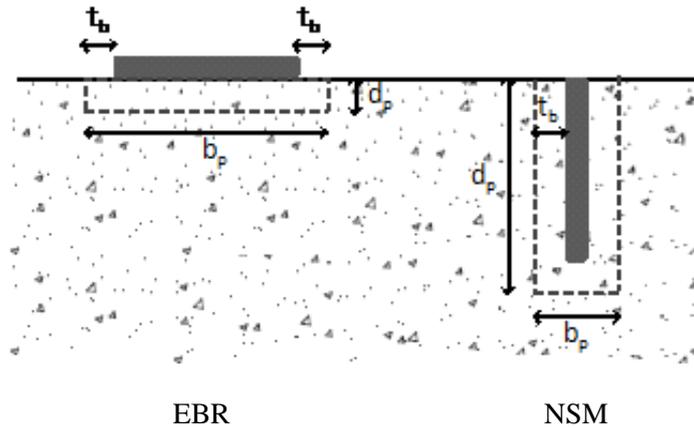


Figura 2.3 – Plano de falha para a técnica EBR e NSM. Adaptado de [43].

O modelo de Seracino et al. [43] propõe calcular o comprimento efetivo de ligação pela equação:

$$L_{eff} = \frac{\pi}{2 \sqrt{\frac{\tau_{max} L_{per}}{s_{max} E_f A_f}}} \quad (2.10)$$

onde τ_{max} é a tensão de aderência máxima dado pela equação:

$$\tau_{max} = (0.802 + 0.078 \frac{d_p}{b_p}) f_c^{0.6} \quad (2.11)$$

e s_{max} é o deslizamento máximo determinado por:

$$s_{max} = \frac{0.73}{\tau_{max}} \left(\frac{d_p}{b_p} \right)^{0.5} (f_c)^{0.67} \quad (2.12)$$

Nos casos em que o comprimento de colagem é inferior ao comprimento efetivo o modelo de Seracino et al. [43] propõe o uso da expressão:

$$F_{(L_b < L_{eff})} = \frac{L_b}{L_{eff}} F_{max} \quad (2.13)$$

De acordo com os resultados experimentais obtidos por Hosseini et al. [31] verifica-se que os modelos de Chen e Teng [17] e Seracino et al. [43] preveem com boa precisão os valores de cargas de rotura para $L_b > L_{eff}$, enquanto o modelo proposto pelo Boletim 14 da fib [29] sobrestima bastante estes valores, em cerca de 20%. Para $L_b < L_{eff}$, os resultados obtidos pelos três modelos divergem bastante dos valores experimentais.

O comprimento efetivo da ligação determinado pelos modelos do boletim 14 da fib [29] e de Chen e Teng [17] é de cerca de 70 mm, enquanto para o modelo de Seracino et al. [43] é de cerca de 40 mm. Com base nos resultados experimentais, verificou-se que quando se aumentava o comprimento de colagem além de 35 mm as cargas de rotura praticamente não se alteravam. Consequentemente, pode concluir-se que o comprimento efetivo da ligação é de cerca de 35 mm. O que leva a concluir que os modelos do Boletim14 da fib [29] e de Chen e Teng [17] sobrestimam bastante este valor. Em contrapartida, o modelo proposto por Seracino et al. [43] consegue prever valores bastante mais próximos dos experimentais.

Concluiu-se assim, que o modelo proposto pelo boletim 14 da fib [29] sobrestima o comprimento efetivo da ligação bem como as cargas de rotura. O modelo proposto por Chen e Teng [17] também sobrestima o comprimento efetivo da ligação, no entanto consegue prever com boa precisão as cargas de rotura para $L_b > L_{eff}$. Por outro lado, o modelo proposto por Seracino et al. [43] prevê com boa precisão o comprimento de ligação efetivo e as cargas de rotura para $L_b > L_{eff}$.

Como já foi mostrado anteriormente, o Boletim 14 da fib [29] considera valores constantes para c_1 e c_2 . Como este modelo sobrestima o comprimento de ligação efetivo e as cargas de rotura, Hosseini et al. [31] sugerem outros valores para as constantes, $c_1=0,53$ e $c_2=7,7$, em vez de $c_1=0,64$ e $c_2=2,0$.

No caso do modelo de Chen e Teng, Hosseini et al. [31] sugerem a introdução de um fator de redução, $c=0,5$, na equação (2.8), levando a uma diminuição do comprimento de ligação efetivo, ficando:

$$L_{eff} = c \cdot \sqrt{\frac{E_f t_f}{f_c}} \quad (2.14)$$

Como L_{eff} é utilizado diretamente na expressão da carga de rotura, houve necessidade de alterar o parâmetro α para 0,854 (0.427/0.5). Em contrapartida, no modelo de Seracino et al. [43] não houve necessidade de fazer alterações.

Mazzotti et al. [34] analisaram o efeito do início da colagem do compósito de FRP a peças de betão armado com o intuito de se perceber esta influência no desempenho final da ligação CFRP/betão. Por isso, foram comparados os resultados experimentais obtidos para amostras em que o laminado é colado a partir do lado da frente do bloco de betão (veja-se a Figura 2.4 (a)) e para amostras em que o laminado é colado a uma determinada distância a partir do lado da frente do bloco de betão (veja-se a Figura 2.5 (a)).

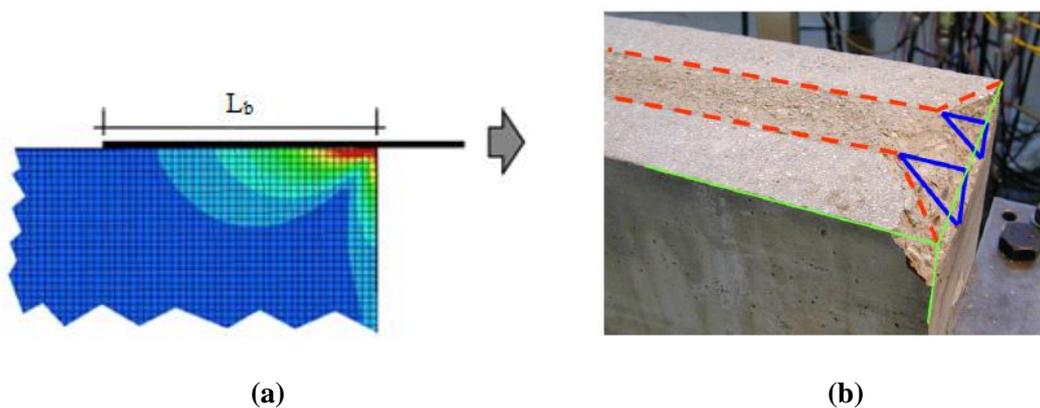


Figura 2.4 – Laminado colado a partir do lado da frente do bloco de betão: (a) distribuição de tensões de tração; (b) amostra depois do descolamento [34].

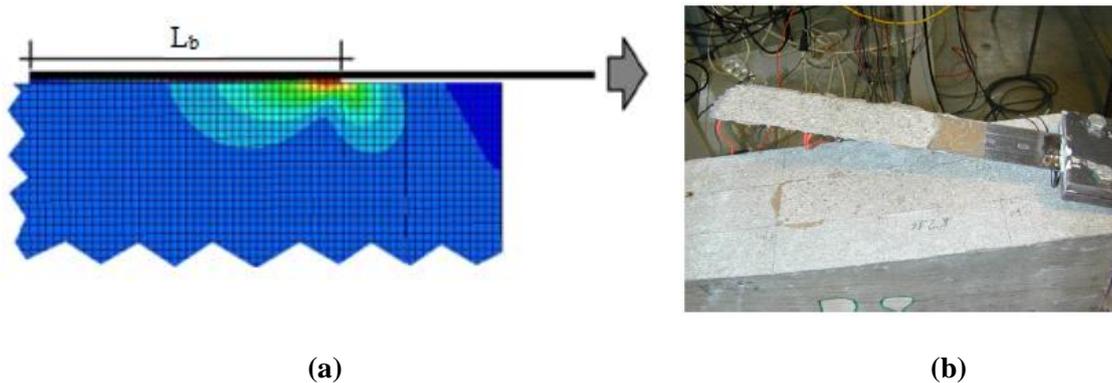


Figura 2.5 - Laminado colado a uma distância a partir do lado da frente do bloco de betão: (a) distribuição de tensões de tração; (b) amostra depois do descolamento [34].

Através dos resultados experimentais obtidos por Mazzotti et al. [34] verificou-se que quando o laminado é colado perto da extremidade do bloco de betão surgem tensões de tração muito elevadas nesta zona, levando a uma falha inicial que provoca o destacamento de um prisma de betão de seção triangular, conforme se mostra na Figura 2.4 (b). Por outro lado, quando se deixou um comprimento não colado junto à extremidade carregada de 100 mm, as tensões de tração baixaram e o modo de rotura foi alterado tendo-se observado um descolamento mais regular ao longo da amostra, conforme se mostra na Figura 2.5 (b).

2.6. Tipos de ensaios de arrancamento

Para estudar a ligação entre o compósito de FRP e a estrutura a reforçar têm sido realizados imensos ensaios experimentais destrutivos. Os ensaios mais utilizados na caracterização da ligação deste sistema de reforço são os ensaios de corte simples ou duplo, ensaios pull-off e ensaios de arrancamento. Todos estes ensaios são de fácil execução, sendo que alguns são mais utilizados em laboratório e outros em obra.

Estes ensaios são muito importantes, pois permitem obter parâmetros fundamentais para definir o desempenho deste tipo de reforço.

Nestes ensaios, pode medir-se, por exemplo, os deslizamentos do compósito relativamente à superfície colada, na extremidade carregada e na extremidade livre, força imposta ao sistema de reforço e extensões do FRP ao longo do comprimento colado.

Este subcapítulo explicará, de forma sucinta, a diferença entre os ensaios mais utilizados.

2.6.1. Ensaios de corte simples ou duplo

Para a realização de ensaios de corte simples, os provetes de betão são reforçados numa das faces com compósitos de FRP. Nestes ensaios é imposta uma força de tração longitudinal ao compósito, conforme mostra a Figura 2.6.

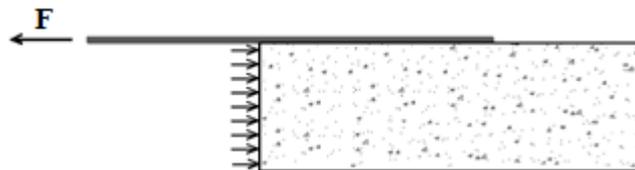


Figura 2.6 - Ensaio de corte simples [5].

Este tipo de ensaio é um dos mais usuais devido à facilidade de execução e por permitir solicitar a ligação apenas no corte, o que proporciona uma melhor fiabilidade dos resultados daí provenientes, razão pela qual têm sido bastante utilizados. Yao et al. [47] recorreram a ensaios de corte simples com a técnica EBR no sentido de padronizar os ensaios de corte para aferir o desempenho da ligação FRP/betão. Como os resultados experimentais obtidos por este tipo de ensaio estão em concordância com as estimativas obtidas teoricamente pelo modelo de Chen e Teng [17], Yao et al. [47] concluíram que este ensaio deveria ser o ensaio padrão a considerar em futuras normas/códigos

Os compósitos podem ainda ser colados em duas faces opostas do provete de betão, conforme se representa na Figura 2.7. Estes ensaios são denominados por ensaios de corte duplo, uma vez que são testadas duas ligações em simultâneo durante o ensaio.

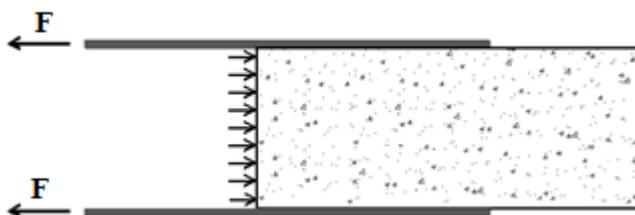


Figura 2.7 – Ensaio de corte duplo [5].

Este tipo de ensaio não é só utilizado para a técnica EBR, também é utilizado para analisar o comportamento da técnica NSM. Por exemplo, Macedo et al. [33] utilizaram este tipo de ensaio com a técnica NSM para caracterizar a ligação do compósito de FRP ao betão. Estes autores estudaram a influência da profundidade a que o FRP é colocado no desempenho final da ligação CFRP/betão. A configuração do ensaio, adaptado de [33], está apresentada na Figura 2.8.

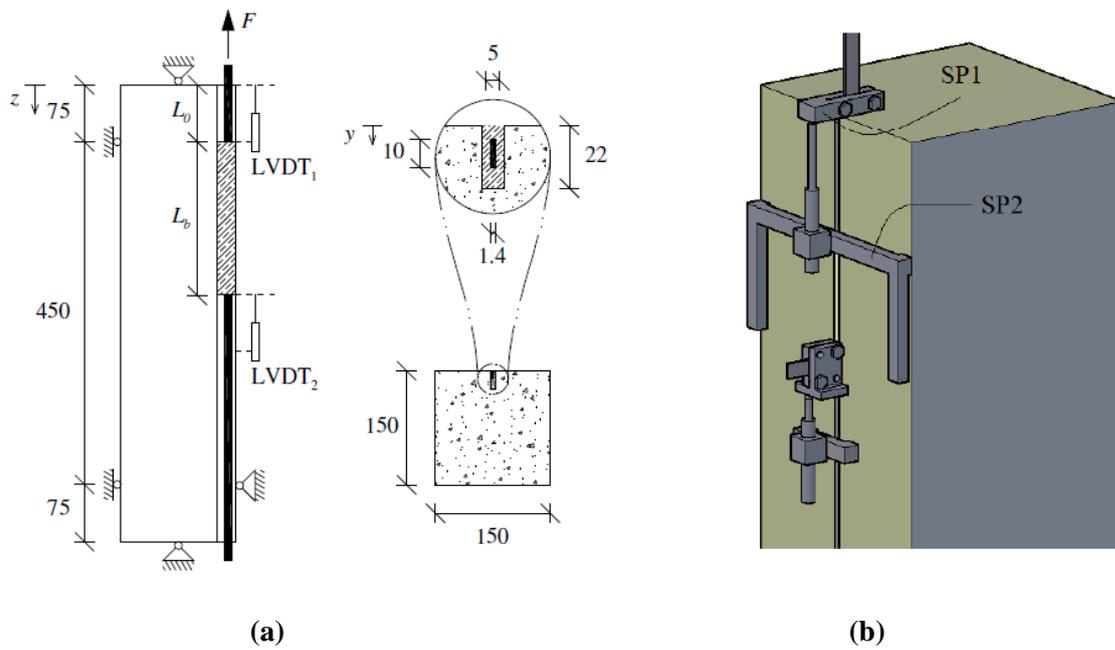


Figura 2.8 - Ensaio de corte direto para a técnica NSM: (a) configuração e dimensões do provete; (b) detalhe das peças utilizadas para colocar os LVDTs. Adaptado de [33].

2.6.2. Ensaios *pull-off* ou de arrancamento direto

O ensaio *pull-off* ou de arrancamento direto tem como principal objetivo estudar a ligação da interface entre o compósito e o betão através da caracterização do modo I de fratura. Este ensaio, esquematizado na Figura 2.9, consiste em colar uma pastilha metálica ao FRP e proceder ao seu arrancamento aplicando, para o efeito, uma força com direção perpendicular à superfície colada. A tensão de aderência, τ , é calculada através da expressão:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.15)$$

onde F e A são, respetivamente, a força de arrancamento e a área da seção da pastilha metálica.

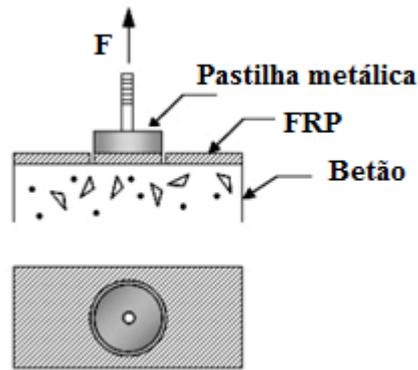


Figura 2.9 - Ensaio pull-off [8].

2.6.3. Ensaios de arrancamento

Os ensaios de arrancamento caracterizam-se pelo facto da força estar aplicada perpendicularmente ao plano de colagem. Este ensaio é preparado da mesma forma que o ensaio de corte simples, em que o compósito é colado a uma das faces do provete a reforçar. A Figura 2.10 mostra a configuração deste tipo de ensaio.

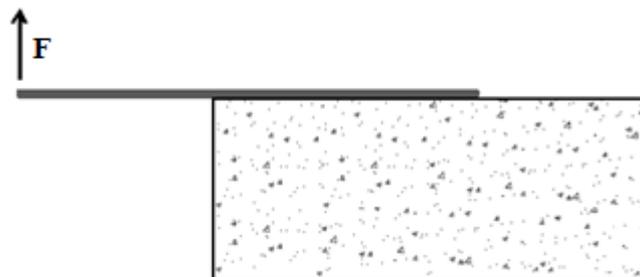


Figura 2.10 - Ensaio de arrancamento [5].

2.7. Modos de rotura da interface

Para o estudo do reforço de compósitos de FRP em elementos de betão armado é fundamental perceber o que ocorre na interface que liga estes dois materiais. Este estudo é fulcral para se entender a viabilidade deste tipo de reforço, conseguindo, assim, evitar e melhorar aspetos negativos encontrados neste sistema de reforço.

O conhecimento de possíveis roturas associadas a estruturas reforçadas com estes compósitos é fundamental, uma vez que permite definir, com maior rigor, os parâmetros de dimensionamento. No caso de vigas de betão armado reforçadas com compósitos de FRP as roturas podem ser devidas a diversas causas. O boletim 14 da fib [29] apresenta as principais causas:

- i. Destacamento nas zonas de ancoragem não fendilhadas;
- ii. Destacamento a partir de fendas de flexão;
- iii. Destacamento a partir de fendas de corte;
- iv. Destacamento devido a irregularidade na superfície de betão a reforçar.

O fib boletim 14 [29] considera dois tipos de roturas: (i) rotura clássica; e (ii) rotura prematura.

A rotura clássica é a rotura em que a interface se mantém intacta até que o betão atinja o esmagamento por compressão ou o FRP atinja a sua tensão limite de tração, pelo que o sistema mantém-se eficaz até que um dos elementos atinja a sua capacidade resistente. Este tipo de rotura é a mais desejável e pode ter três modos diferentes [29]:

- i. Cedência das armaduras seguida de esmagamento do betão;
- ii. Cedência das armaduras seguida de colapso do compósito FRP;
- iii. Esmagamento do betão, sem existir cedência das armaduras.

Por outro lado, a rotura prematura é caracterizada pela ação do reforço ser perdida primeiro do que nas roturas clássicas, devido a anomalias na interface, pelo que, a capacidade resistente do material de reforço não é totalmente explorada. O boletim 14 da fib [29] considera os seguintes modos de rotura prematura que podem ocorrer em ensaios de arrancamento:

- i. Destacamento pelo betão;
- ii. Descolamento pelo adesivo (rotura coesiva), em que normalmente, após o descolamento, a resina e uma pequena camada de betão permanecem no compósito de FRP, uma vez que, normalmente, as resistências à tração no adesivo são superiores às do betão;
- iii. Descolamento pela interface betão-adesivo ou adesivo-FRP (rotura adesiva), que ocorre se o processo de preparação da superfície durante a aplicação do FRP foi insuficiente, ou se a classe de resistência do betão for muito alta;
- iv. Delaminação do FRP.

Como já foi também referido anteriormente, na técnica NSM não é assim tão comum verificarem-se roturas prematuras como no caso da técnica EBR. No entanto, nesta técnica, as roturas prematuras também podem ocorrer. Segundo De Lorenzis e Teng [22], a rotura prematura de reforço com FRP por esta técnica podem ocorrer de várias formas:

- i. Rotura na interface entre o adesivo e o compósito;
- ii. Rotura na interface entre o adesivo e o betão;
- iii. Rotura pelo adesivo;
- iv. Rotura pelo betão;
- v. Rotura do betão e do adesivo ao longo de planos inclinados, conforme mostra a Figura 2.11 (a);

- vi. Ruptura de canto que ocorre quando o compósito é colado demasiado próximo de uma das arestas do elemento de betão a reforçar (Figura 2.11 (b)).

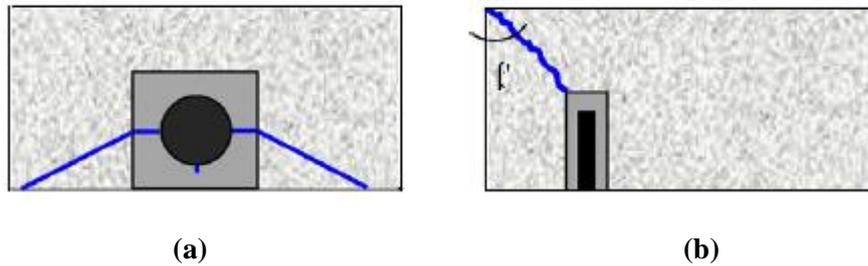


Figura 2.11 - Roturas na técnica NSM: (a) ruptura do betão e do adesivo ao longo de planos inclinados; (b) ruptura de canto [22].

2.8. Leis *bond-slip*

A lei *bond-slip*, bastante invocada na literatura, é uma curva de tensões de aderência vs. deslizamento relativo entre o FRP e o substrato. Na literatura, como por exemplo em [9, 18], são encontrados vários tipos de leis *bond-slip*, que têm como objetivo simular o comportamento real da interface entre o compósito e o substrato a reforçar. Estas curvas são determinadas através de ensaios experimentais. A Figura 2.12 apresenta algumas leis *bond-slip* encontradas na literatura [9]. Os modelos (a), (b), (c) e (f) são os mais simples, pois são modelos lineares ou bi-lineares no caso do modelo (f). No entanto, estes modelos não conseguem aproximar, com precisão, o comportamento real da interface. Os modelos lineares ou bi-lineares têm sido utilizados por alguns autores, como por exemplo em [16, 27], para aproximar o desempenho não-linear da interface entre o FRP e o betão, de forma a determinar expressões analíticas que descrevam o processo de descolamento. Por outro lado, os modelos não lineares, como os modelos (d) e (e) da Figura 2.12, são muito usados, pois têm mostrado serem capazes de representar melhor os resultados obtidos experimentalmente pelo que, este tipo de modelo permite simular, com rigor, o comportamento real da interface.

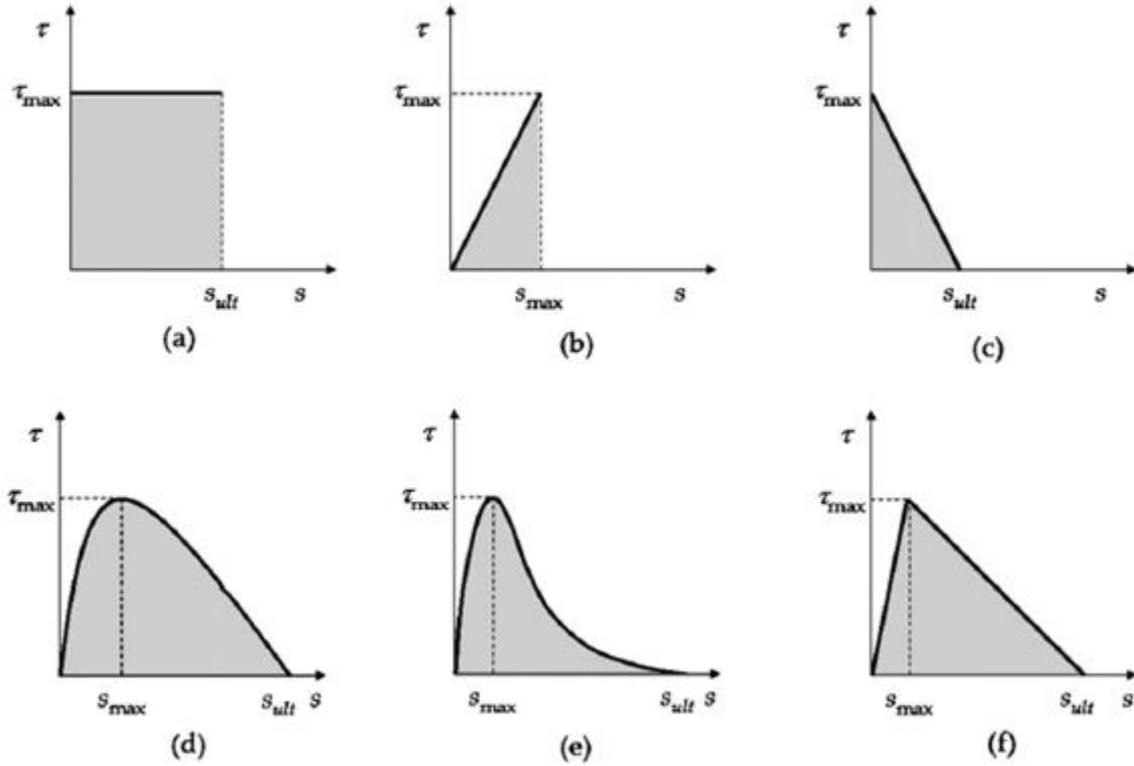


Figura 2.12 - Alguns modelos bond-slip encontrados na literatura [9].

Para definir as leis *bond-slip* não lineares existem algumas expressões, que são facilmente encontradas na literatura. As expressões mais utilizadas são:

1) Dimande [24]:

$$\frac{\tau(s)}{\tau_{max}} = \frac{s}{s_{max}} \cdot e^{1 - \frac{s}{s_{max}}} \quad (2.16)$$

onde s_{max} e τ_{max} são, respetivamente, o deslizamento máximo e a tensão de aderência máxima.

2) Popovics [36]:

$$\frac{\tau(s)}{\tau_{max}} = \frac{s}{s_{max}} \cdot \frac{n_p}{(n_p - 1) + \left(\frac{s}{s_{max}}\right)^{n_p}} \quad (2.17)$$

onde n_p é uma constante que faz aproximar a expressão de Popovics ao comportamento real da interface entre o compósito e o substrato a reforçar.

3) Ueda e Dai[19]:

$$\frac{\tau(s)}{\tau_{max}} = 4 \cdot (e^{-\ln(2) \cdot \frac{s}{s_{max}}} - e^{-2 \cdot \ln(2) \cdot \frac{s}{s_{max}}}) \quad (2.18)$$

onde a tensão de aderência máxima, τ_{max} , e o deslizamento máximo, s_{max} , são, respetivamente, dados por:

$$\tau_{max} = \frac{B \cdot \varepsilon_{max}^2 \cdot E_f \cdot t_f}{4} \quad (2.19)$$

e

$$s_{max} = \frac{\ln(2)}{B} \quad (2.20)$$

onde B é um índice de rigidez obtido experimentalmente através da curva extensão vs. deslizamento; E_f e t_f são, respetivamente, o módulo de elasticidade e a espessura do compósito. A extensão máxima, ε_{max} , no compósito de FRP é dada por:

$$\varepsilon_{max} = \sqrt{\frac{2G_F}{E_f \cdot t_f}} \quad (2.21)$$

onde G_F é a energia de fratura (área delimitada pela curva *bond-slip*).

2.8.1. Equações governativas da ligação FRP/betão

Admitindo que o compósito de FRP é submetido a uma força, F , em $x=L_b$, em que L_b é o comprimento de colagem e a extremidade oposta, em $x=0$, é considerada livre, pois não está submetida a forças. O equilíbrio do troço dx da ligação FRP/betão leva às equações fundamentais (veja-se a Figura 2.13):

$$\frac{d\sigma_f(x)}{dx} - \frac{\tau(x)}{t_f} = 0 \quad (2.22)$$

$$\frac{d\sigma_c(x)}{dx} + \frac{\tau(x) \cdot b_f}{t_c \cdot b_c} = 0 \quad (2.23)$$

$$\sigma_f(x) \cdot b_f \cdot t_f + \sigma_c(x) \cdot t_c \cdot b_c = F \quad (2.24)$$

onde σ_f é a tensão normal no compósito de FRP e $\sigma_c(x)$ é a tensão normal no substrato de betão.

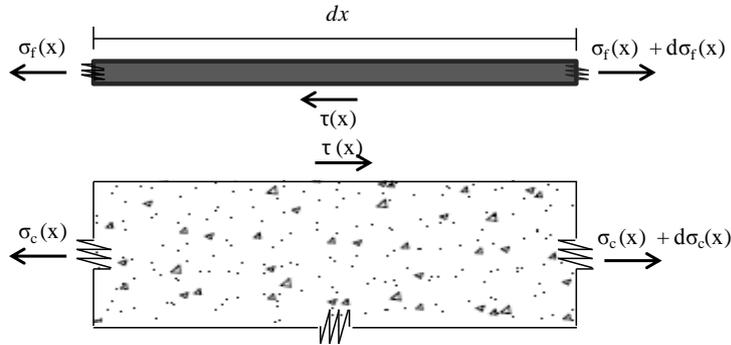


Figura 2.13 – Pormenor das tensões instaladas na ligação do FRP ao substrato de betão.

A tensão normal no compósito, $\sigma_f(x)$, e no substrato a reforçar, $\sigma_c(x)$, são:

$$\sigma_f(x) = E_f \cdot \frac{du_f(x)}{dx} \quad (2.25)$$

$$\sigma_c(x) = E_c \cdot \frac{du_c(x)}{dx} \quad (2.26)$$

onde E_f e E_c são, respetivamente, o módulo de Young do compósito e do substrato de betão; e $du_f(x)/dx$ e $du_c(x)/dx$ são, respetivamente, a extensão no compósito e no substrato.

O deslocamento relativo (deslizamento) entre o compósito e o substrato de betão pode ser dado por:

$$s(x) = u_f(x) - u_c(x) \quad (2.27)$$

onde u_f é o deslocamento do compósito e u_c o deslocamento do substrato.

Derivando a equação (2.27) em ordem a x , resulta:

$$\frac{ds(x)}{dx} = \frac{du_f(x)}{dx} - \frac{du_c(x)}{dx} \quad (2.28)$$

Substituindo (2.25) e (2.26) na equação (2.28):

$$\frac{ds(x)}{dx} = \frac{\sigma_f(x)}{E_f} - \frac{\sigma_c(x)}{E_s} \quad (2.29)$$

Derivando a equação (2.29) em ordem a x, obtém-se:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} = \frac{1}{E_f} \cdot \frac{d\sigma_f(x)}{dx} - \frac{1}{E_s} \cdot \frac{d\sigma_c(x)}{dx} \quad (2.30)$$

Substituindo (2.22) e (2.23) na equação (2.30), tem-se:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} - \lambda^2 \cdot \tau(s) = 0 \quad (2.31)$$

onde

$$\lambda^2 = \frac{1}{E_f \cdot t_f} + \frac{b_f}{E_c \cdot t_c \cdot b_c} \quad (2.32)$$

Normalmente, $1/E_f \cdot t_f \gg b_f/(E_c \cdot t_c \cdot b_c)$ pelo que:

$$\lambda^2 = \frac{1}{E_f \cdot t_f} \quad (2.33)$$

Assim, tem-se:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} - \frac{\tau(s)}{E_f t_f} = 0 \quad (2.34)$$

2.8.2. Modelo proposto por Ueda e Dai [20]

Ueda e Dai [20] propuseram um modelo não-linear que pretende prever o processo de descolamento entre o laminado de FRP e o substrato de betão. Este modelo é válido quando as características da ligação entre o laminado de FRP e o betão se mantêm uniformes ao longo da largura do laminado.

A partir do ensaio de corte simples representado na Figura 2.14, a lei *bond-slip* da ligação FRP/betão pode ser obtida a partir da relação entre a extensão no FRP e o deslizamento na extremidade carregada:

$$\varepsilon = f(s) \quad (2.35)$$

onde ε e s são, respetivamente, a extensão no FRP e o deslizamento na interface em qualquer local da ligação.

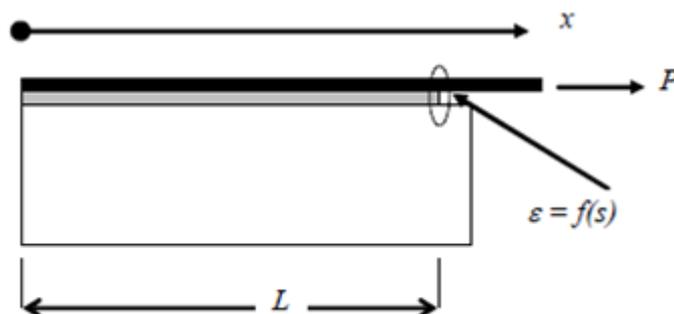


Figura 2.14 - Configuração do ensaio [20].

Para comprimentos longos para a técnica EBR com laminados de secção retangular, Ueda e Dai [20] verificaram que a extensão no FRP vs. deslizamento pode ser aproximado pela expressão:

$$\varepsilon = f(s) = A(1 - e^{-Bs}) \quad (2.36)$$

onde A representa a extensão máxima atingida no ensaio experimental e B é um índice de rigidez obtido experimentalmente através da curva extensão vs. deslizamento. A Figura 2.15 apresenta um exemplo no qual se consegue perceber que a equação (2.36) consegue aproximar com muita precisão a extensão observada experimentalmente em [20].

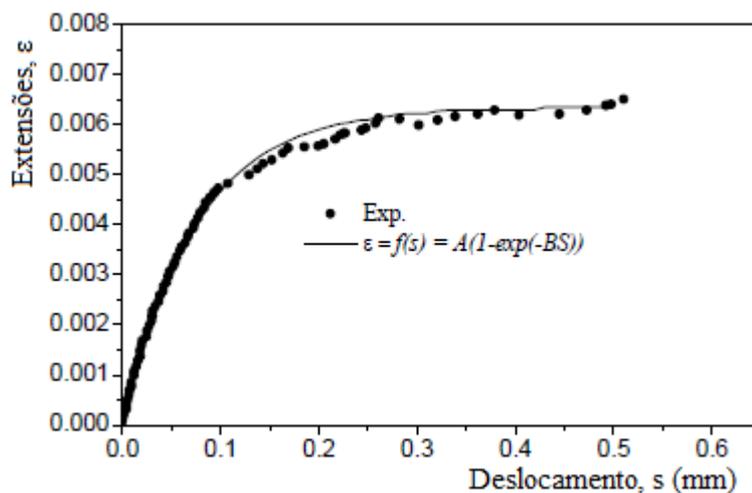


Figura 2.15 - Relação típica extensão-deslizamento observada nos ensaios experimentais. Adaptado de [20].

Com base na equação (2.36), Ueda e Dai [20] propuseram uma lei *bond-slip* exponencial dada por:

$$\tau(s) = 4 \cdot \tau_{max} \cdot \left(e^{-\ln(2) \cdot \frac{s}{s_{max}}} - e^{-2 \cdot \ln(2) \cdot \frac{s}{s_{max}}} \right) \quad (2.37)$$

A partir da lei bond-slip (2.37), Ueda e Dai [20] encontraram uma equação de deslizamentos ao longo do comprimento colado, dada por:

$$s(x) = \frac{s_{max}}{\ln(2)} \cdot \ln \left(e^{\frac{\ln(2)}{s_{max}} \cdot (Ax + C_2)} + 1 \right) \quad (2.38)$$

em que C_2 é uma constante definida por:

$$C_2 = \frac{\ln \left(\frac{\frac{F}{b_f \cdot E_f \cdot t_f}}{A - \frac{F}{b_f \cdot E_f \cdot t_f}} \right)}{\frac{\ln(2)}{s_{max}}} - A \cdot L \quad (2.39)$$

e A é a extensão máxima dada por:

$$A = \sqrt{\frac{4 \cdot \tau_{max} \cdot s_{max}}{E_f \cdot t_f \cdot \ln(2)}} \quad (2.40)$$

Este modelo, proposto por Ueda e Dai [20], consegue prever bastante bem o comportamento da interface entre o compósito de FRP e o substrato de betão. No entanto, apresenta algumas limitações. Uma limitação prende-se no facto de não ser possível analisar o comportamento de descolamento completo do sistema de reforço com este modelo, sendo apenas possível analisar o comportamento até ao colapso, ou seja, até ser atingida a carga máxima. Outra limitação reside no facto deste modelo admitir apenas comprimentos longos, ou seja, para comprimentos superiores ao comprimento efetivo da ligação. Isto acontece porque no modelo de Ueda e Dai [20] são admitidas as condições de fronteira:

$$\varepsilon(x)_{x=0} = \left(\frac{ds(x)}{dx} \right)_{x=0} = 0 \text{ e } s(x)_{x=0} = 0 \quad (2.41)$$

e a segunda condição de fronteira só é válida para comprimentos colados superiores ao comprimento efetivo da ligação, $L_b > L_{eff}$.

2.8.2.1. NSM com laminados de secção retangular

Também é possível encontrar uma equação para analisar os deslizamentos e extensões ao longo do compósito de FRP e a distribuição das tensões de aderência na interface para a técnica NSM com laminados de secção retangular. A equação governativa para a técnica NSM com laminados de secção retangular é a seguinte [11]:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} - \frac{2 \cdot \tau(s)}{E_f \cdot t_f} = 0 \quad (2.42)$$

A equação de deslizamentos ao longo do comprimento de colagem pode ser determinada de forma análoga à utilizada para a técnica EBR. A função de deslizamento continua a ser dada pela equação (2.38). Sendo, no entanto, a extensão máxima, A, definida por:

$$A = \sqrt{\frac{8 \cdot \tau_{max} \cdot s_{max}}{E_f \cdot t_f \cdot \ln(2)}} \quad (2.43)$$

2.8.2.2. NSM com varões de secção circular

Para o caso da técnica NSM com varões de secção circular, a equação governativa é dada por [11]:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} - \frac{4 \cdot \tau(s)}{E_f \cdot \phi_f} = 0 \quad (2.44)$$

De forma análoga à técnica EBR e NSM com laminados de secção retangular, os deslizamentos ao longo do comprimento colado continuam a ser definidos pela equação (2.38).

Sendo agora a extensão, A, e a constante C_2 definidos, respetivamente, por:

$$A = \sqrt{\frac{16 \cdot \tau_{max} \cdot s_{max}}{E_f \cdot \phi_f \cdot \ln(2)}} \quad (2.45)$$

e

$$C_2 = \frac{\ln\left(\frac{\frac{F}{\pi \cdot \phi_f^2 / 4 \cdot E_f}}{A - \frac{F}{\pi \cdot \phi_f^2 / 4 \cdot E_f}}\right)}{\frac{\ln(2)}{s_{max}}} - A \cdot L \quad (2.46)$$

2.9. Estudo do pós-colapso da interface FRP/betão

Vários autores, por exemplo [8, 35], têm estudado o pós-colapso da interface do FRP ao material a reforçar através de modelos numéricos. Alguns autores, por exemplo [14, 18, 28], identificaram um fenómeno de *snap-back* durante a fase de pós-colapso. Este fenómeno ocorre para comprimento de colagem longos, ou seja, para comprimentos colados maiores que o comprimento efetivo da ligação. Outros autores [10, 45], concluíram que para comprimentos de colagem longos o descolamento completo ocorre quando o deslizamento último é atingido na ligação FRP/betão. Estas diferentes conclusões são justificadas pela limitação do deslizamento último (s_{ult}) na curva *bond-slip*. Assim, se esta curva não tiver qualquer limitação de deslizamento, o fenómeno de *snap-back* ocorre, ou seja, de acordo com a curva 1 da Figura 2.16. Por outro lado, quando se limita a lei *bond-slip* a s_{ult} o descolamento total da interface tende para o deslizamento último conforme se mostra na curva 2 da Figura 2.16.

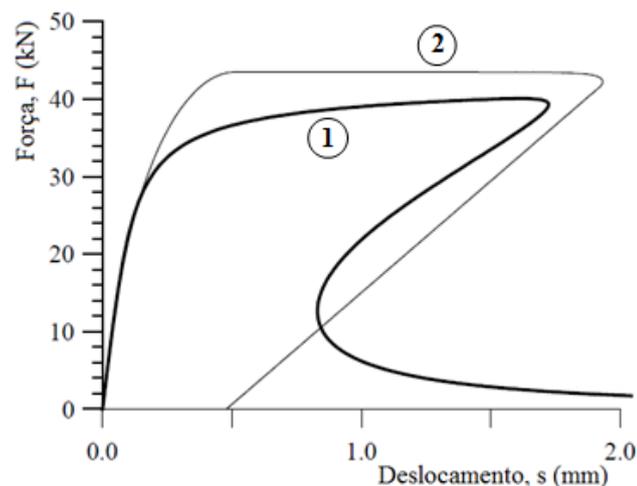


Figura 2.16 – Curvas carga-deslizamento para o modelo proposto por Ferracuti [27], curva 1, e para uma lei *bond-slip* bi-linear [27], curva 2. Adaptado de [27].

De forma a descrever o descolamento completo da interface FRP-betão, Ferracuti [27] desenvolveu um modelo numérico assumindo um modelo *bond-slip* baseado na fórmula de Popovics [36]. O modelo numérico desenvolvido por Ferracuti [27] teve por base ensaios experimentais realizados por Chajes et al. [16]. Este modelo numérico assume que a distribuição das tensões de aderência é constante ao longo da largura da interface. O processo de descolamento foi estimado fazendo-se controlar esse processo por incremento de deslizamento. Inicialmente, o controlo de deslizamento foi feito na extremidade de FRP carregada, em $x=L_b$. No entanto, quando o deslizamento e a carga diminuíam o incremento de deslizamento não consegue descrever o fenómeno de *snap-back*, pelo que Ferracuti [28] optou por realizar o controlo de deslizamento na extremidade livre, em $x=0$, uma vez que nesta extremidade, e durante todo o processo de

descolamento, o deslizamento em $x=0$ é monotónico. Este controlo na extremidade livre permitiu assim observar o descolamento completo da interface. A curva 1 da Figura 2.16 apresenta o resultado obtido numericamente por Ferracuti [27] e a curva 2 apresenta o resultado obtido por um modelo baseado numa lei *bond-slip* bi-linear também por Ferracuti [27].

Existem na literatura soluções analíticas que permitem analisar o descolamento, refere-se, por exemplo, os trabalhos realizados por Yuan et al. [48] e Caggiano et al. [13] cujas soluções teóricas são baseadas em modelos *bond-slip* bi-lineares.

2.10. Códigos e regulamentação

De forma a facilitar a utilização dos sistemas de reforço por colagem de compósitos de FRP têm sido criados vários códigos e regulamentações que pretendem uniformizar e regulamentar o dimensionamento de ligações FRP/betão. A regulamentação a nível europeu centra-se sobretudo nos documentos publicados pelo boletim 14 da fib [29], o qual apresenta as propriedades dos materiais e ao mesmo tempo faz recomendações de dimensionamento, aplicação e controlo de qualidade. É de salientar que este documento apresenta informação relativa apenas ao sistema de reforço com compósitos de FRP pela técnica EBR. Outro documento bastante utilizado nesta área é o Comité 440 do American Concrete Institute (ACI) [1]. Esta instituição é uma das principais responsáveis pelo estudo da aplicação de compósitos no reforço por colagem de FRP em estruturas de betão armado, pelo que este documento se tornou numa referência a nível mundial.

Os códigos ou regulamentações definem expressões para a força máxima e comprimento de ligação efetivo com base em trabalhos experimentais de diferentes autores. No subcapítulo 2.5 foram apresentadas algumas delas que permitem não só calcular a força máxima transmitida ao reforço como também permitem calcular o comprimento efetivo da ligação.

Capítulo 3 - Programa Experimental

3.1. Aspectos gerais

Como já foi referido anteriormente, a componente experimental deste trabalho tem como intuito estudar o comportamento da ligação de um sistema de reforço com CFRP a um substrato de betão armado. O estudo do comportamento da ligação do compósito de FRP ao betão armado foi feito com recurso a ensaios de corte simples. Nos ensaios de corte simples, a força foi aplicada no FRP monotonicamente até à rotura. O comportamento da ligação foi analisado através da avaliação das cargas de rotura, deslizamentos, extensões e distribuições de tensões de aderência ao longo do comprimento colado.

Com o propósito de se perceber as diferenças que as técnicas de colagem do compósito podem ter no sucesso do sistema de reforço, optou-se por se utilizar duas técnicas de colagem distintas: EBR e NSM. Para se perceber a influência do comprimento colado no desempenho da interface realizaram-se ensaios para diferentes comprimentos colados. Na técnica EBR assumiram-se quatro comprimentos diferentes: 50 mm, 100 mm, 150 mm e 300mm, sendo que na técnica NSM assumiram-se também quatro comprimentos diferentes: 50 mm, 100 mm, 150 mm e 200 mm. Foram realizados 11 ensaios de corte simples para a técnica EBR e 8 para a técnica NSM.

O presente capítulo apresenta a caracterização dos materiais que são utilizados nos ensaios de corte simples do presente estudo. Este capítulo não se destina apenas a caracterizar os materiais utilizados, mas também a caracterizar o sistema de ensaio e a instrumentação que foi necessário recorrer para a realização dos ensaios de corte simples.

3.2. Caracterização dos materiais

Este subcapítulo pretende caracterizar os materiais que foram usados nas amostras que foram submetidas aos ensaios de corte simples. Caracteriza-se, então, os laminados de fibras de carbono, a resina de ligação e os blocos de betão que foram reforçados.

3.2.1. Fibras de carbono S&P 150/2000 (10x1,4) [38]

O material compósito utilizado para reforçar os blocos de betão foi um laminado de fibras de carbono, CFRP. Este laminado foi cedido pela empresa S&P e tem uma largura de 10 mm e uma espessura de 1,4 mm. Este tipo de compósito apresenta as fibras orientadas numa única direção.

A caracterização dos laminados CFRP foi feita através de ensaios de caracterização levados a cabo por Carvalho [15] nas instalações do Departamento de Engenharia Civil da FCT-UNL. Para a realização destes ensaios foi utilizada uma máquina de tração universal Zwick com uma capacidade de carga de 50 kN e foram seguidos os procedimentos presentes nas normas ASTM D3039/D3039M [4]. Carvalho [15] realizou cinco ensaios à tração, tendo monitorizado extensões *vs.* forças durante os ensaios.

Comparando os valores obtidos experimentalmente com os disponibilizados pelo fabricante [38], constata-se que o valor de tensão de rotura apresenta uma dispersão grande, uma vez que se obteve uma tensão de rotura de 1565 MPa e a disponibilizada pelo fabricante era de 1850 MPa. Quanto ao módulo de elasticidade não se verifica uma dispersão muito grande, pois o fabricante [38] apresenta um módulo de elasticidade de 168 GPa, enquanto o obtido experimentalmente é de cerca de 159 GPa.

3.2.2. Resina S&P 220 [39]

Para colar o laminado de CFRP ao substrato de betão foi utilizado um adesivo epoxídico, S&P 220 [39]. Este adesivo foi também fornecido pela empresa S&P e resulta da mistura de dois componentes, a resina epoxídica e o endurecedor. Estes dois componentes foram misturados na proporção fornecida pelo fabricante [39], 1:4.

Com o intuito de obter informações sobre o comportamento mecânico da resina, Carvalho [15] realizou ensaios à flexão em três pontos em três provetes de resina com 160 mm de comprimento e 40 mm de altura e de largura. Estes ensaios foram realizados nas instalações do Departamento de Engenharia Civil da FCT-UNL. Dos ensaios de caracterização mecânica da resina à tração obteve-se um módulo de elasticidade de 0,79 GPa e uma extensão de 3,65 %.

3.2.3. Betão

Os blocos de betão usados na componente experimental do presente estudo foram betonados no dia 22 de abril de 2010, no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da UNL-FCT. Nesta data foram produzidos 27 blocos com três classes de resistência de betão diferentes, C12/15, C30/37 e C40/50, e com dimensões diferentes. Na mesma data foram também produzidos cubos com 150 mm de aresta para realizar ensaios de compressão para a caracterização do betão. No presente estudo foram utilizados apenas dois blocos de betão de classe C12/15, um para realizar os ensaios pela técnica EBR e outra pela técnica NSM. A Figura 3.1 mostra a geometria e a armadura existente nos blocos de betão armado. A classe de aço utilizada foi A500 e o recobrimento dos blocos de betão armado de 3 cm.

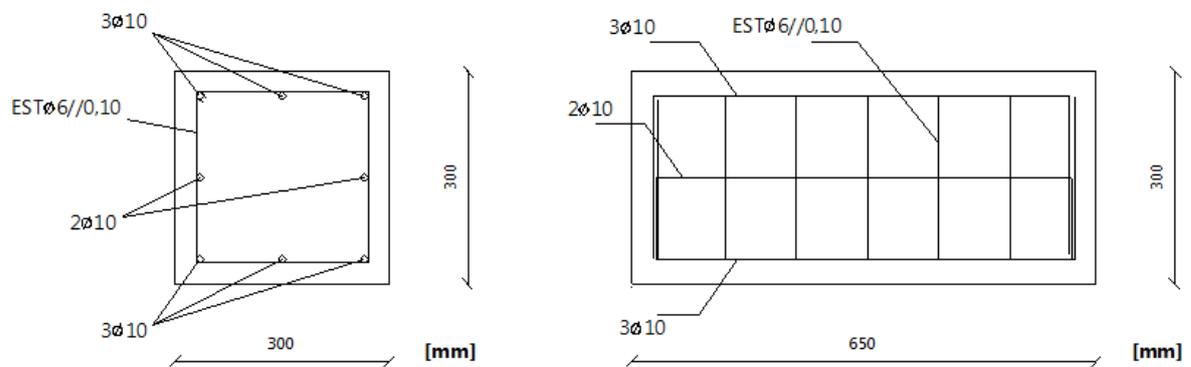


Figura 3.1 - Distribuição da armadura dos blocos de betão.

Aos vinte e oito dias de idade do betão não foram realizados ensaios de caracterização e, por isso, foi necessário realizar ensaios de caracterização durante a execução dos ensaios experimentais do presente estudo. Como neste estudo só se utilizaram blocos de betão de classe C12/15, só esta classe de betão foi caracterizada. Para tal, foram utilizados três cubos, os quais foram ensaiados à compressão uniaxial no dia 19 de março de 2015, no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da FCT-UNL. Os ensaios foram realizados utilizando uma prensa com capacidade de carga de 3000 kN.

A Figura 3.2 mostra o tipo de rotura obtida nos provetes ensaiados.



Figura 3.2 – Modo de rotura dos cubos de betão.

A Tabela 3.1 apresenta os valores obtidos nos ensaios. A determinação da resistência à compressão em cilindros, f_c , foi feita através da expressão:

$$f_c = 0,8 \times f_{c,cub} \quad (3.1)$$

onde $f_{c,cub}$ é a resistência à compressão em cubos.

Tabela 3.1 – Tensões de rotura à compressão dos cubos de betão.

Cubo	Classe de betão	Data da betonagem	$f_{c,cub}$ (MPa)	$f_{cm,cub}$ (MPa)	f_c (MPa)	f_{cm} (MPa)
1			22,4		17,9	
2	C12/15	22-04-2010	22,4	22,7	17,9	18,2
3			23,5		18,8	

O EC 2 [26] apresenta, também, expressões para calcular a resistência média à tração e o módulo de elasticidade.

$$f_{ctm} = 0.3 \cdot (f_{ck})^{2/3} \quad (3.2)$$

e

$$E_{cm} = 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0.3} \quad (3.3)$$

À data dos ensaios de corte, pode considerar-se que a resistência média à tração e o módulo de elasticidade obtidos foram de 1,76 MPa e 26,33 GPa, respetivamente.

3.3. Aplicação do reforço

Aos blocos de betão foram colados compósitos de FRP com largura de 10 mm e diferentes comprimentos de colagem. Consideraram-se também duas técnicas diferentes de colagem de FRP: EBR e NSM.

Com o objetivo de prevenir valores de tensões de tração muito elevados na extremidade carregada, conforme referido no capítulo 2.5, deixou-se em todos os provetes um comprimento não colado entre a face de aplicação da força e a zona da colagem de 50 mm.

Como o método de preparação e aplicação do reforço tem uma grande influência no comportamento do sistema, tentou-se cumprir, com rigor, os passos de preparação e aplicação do FRP, que se tentam descrever em seguida.

3.3.1. Laminado CFRP pela técnica EBR

Para ser possível a aplicação da técnica EBR com sucesso, foi necessário preparar a superfície de betão armado de forma a criar uma rugosidade adequada e posterior limpeza de toda a superfície. Depois de preparada a superfície, colou-se o CFRP com um adesivo epoxídico.

Lembrando as vantagens identificadas no capítulo 2, o método de preparação de superfície escolhido foi o jato de areia. Para o jato de areia foi utilizado um aparelho próprio para o efeito, conforme se mostra na Figura 3.3 (a).



(a)



(b)

Figura 3.3 - Preparação da superfície de betão: (a) aparelho utilizado; (b) preparação da superfície.

Este método permitiu remover a camada superficial do betão até os agregados ficarem visíveis, o que cria uma rugosidade adequada da superfície (Figura 3.4). Espera-se assim, que a aderência entre o CFRP e o betão fique melhor. Aquando da preparação da superfície foram tidas em conta questões relacionadas com o nivelamento e uniformização da superfície a reforçar.



Figura 3.4 - Aspeto da superfície de betão depois de tratada.

Depois de devidamente preparada a superfície, procedeu-se à colagem do laminado no comprimento pretendido. É de notar que antes da aplicação da resina, limpou-se a poeira e impurezas que poderiam encontrar-se no substrato de betão com recurso a um compressor de ar.

O laminado de CFRP foi cortado com o auxílio de uma rebarbadora com o comprimento pretendido para cada amostra. O laminado de CFRP foi ainda limpo com acetona de forma a retirar eventuais sujidades existentes.

Preparou-se a resina, pesando e misturando bem os dois componentes (veja-se a Figura 3.5). Em seguida, foi aplicada a resina no comprimento que se pretende colar, com recurso a uma espátula, de modo a preencher os vazios do betão para melhorar a ligação entre o betão e o compósito (Figura 3.6 (a)).

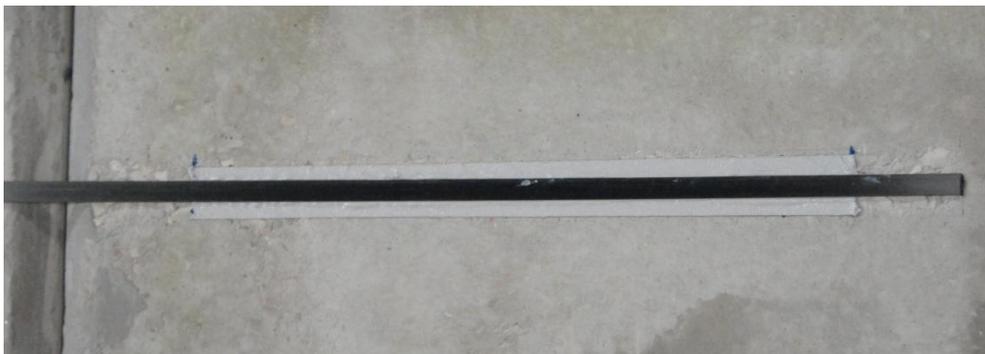
Foi colocado o laminado de FRP, como se mostra na Figura 3.6. Durante todo o processo controlou-se a espessura da camada de adesivo aplicada, tentando-se que esta fosse de aproximadamente 1,4 mm. A cura da resina foi feita a temperatura ambiente durante 7 dias, tendo-se realizado os ensaios de corte após esse período.



Figura 3.5 – Preparação da resina.



(a)



(b)

Figura 3.6 – Aplicação do laminado: (a) aplicação da resina no substrato de betão; (b) aspeto final do laminado colado.

3.3.2. Laminado CFRP pela técnica NSM

A técnica de NSM consiste na abertura de rasgos nas faces laterais de um elemento estrutural de betão armado, com uma profundidade tal que, no caso do betão armado, não seja igual ou superior

ao recobrimento do betão. Nessa ranhura coloca-se o laminado de FRP. Em comparação com a técnica EBR, a técnica NSM permite assim, duplicar a área de aderência entre o betão e o compósito de FRP.

De forma a aplicar corretamente o laminado de CFRP através da técnica NSM foi necessário preparar a superfície de betão a reforçar. Ao contrário da técnica EBR, a técnica NSM não necessita de uma preparação de superfície do substrato de betão tão específica, sendo necessário apenas abrir os rasgos e limpá-los. Depois de se limpar os rasgos foi possível colar o laminado de CFRP com adesivo epoxídico.

A abertura dos rasgos foi feita com o auxílio de uma rebarbadora, conforme se mostra na Figura 3.7, tendo-se ainda garantido que a espessura e a profundidade de corte finais fossem as desejadas. Blaschko [12] sugere que a profundidade e a largura do rasgo deverão ser cerca de 3 mm maiores que a altura e espessura do laminado de FRP, de modo a obter uma espessura de camada de adesivo de cerca de 1-2 mm. Parretti e Nanni [35] recomendam que a largura mínima de uma ranhura não seja inferior a três vezes a espessura do laminado e a profundidade mínima deve ser igual ou superior a uma vez e meia a altura do laminado. Deste modo, escolheu-se fazer rasgos com 15 mm de profundidade, visto que a altura do laminado é de 10 mm, e com aproximadamente 5 mm de largura, já que, recorde-se, a espessura do laminado é de 1,4 mm. Com um rasgo de 5 mm de largura, a espessura de resina é de aproximadamente 1,8 mm.



Figura 3.7 - Abertura dos rasgos.

Foi necessário fazer duas aberturas junto aos locais onde se colariam os laminados: uma abertura junto à extremidade carregada e outra na extremidade livre, conforme se mostra na Figura 3.8. Estas aberturas são feitas com o intuito de se conseguir medir os deslizamentos nas duas extremidades com transdutores de deslizamento, permitindo colar peças de acrílico junto às extremidades do compósito de FRP.



Figura 3.8 – Aberturas feitas junto das extremidades.

Foi necessário limpar os rasgos com recurso a um compressor de ar, eliminando toda a poeira que possa dificultar a aderência entre a resina e o betão. Os laminados de FRP foram também cortados com o auxílio de uma rebarbadora com o comprimento pretendido para cada amostra. Os laminados foram depois limpos com recurso à acetona. A resina foi preparada de forma idêntica à da técnica EBR.

Em seguida, aplicou-se a resina no rasgo ao longo do comprimento que se pretende ligar com o auxílio de espátulas, preenchendo os vazios. O laminado de FRP foi introduzido no rasgo, retirando e espalhando o excesso de resina. Tentou-se garantir que o laminado de FRP ficasse no centro do rasgo e que ficasse vertical. A cura da resina foi feita à temperatura ambiente durante 7 dias, tendo-se realizado os ensaios de corte após este período.



Figura 3.9 – Aplicação do laminado.

A Figura 3.10 mostra o aspeto final do sistema de reforço.



Figura 3.10 - Aspeto final do reforço pela técnica NSM.

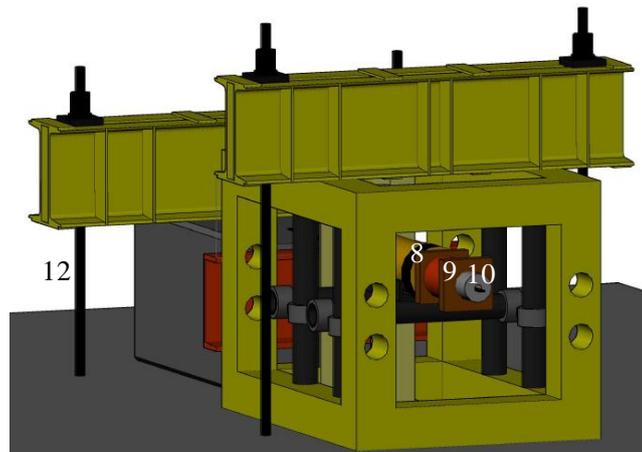
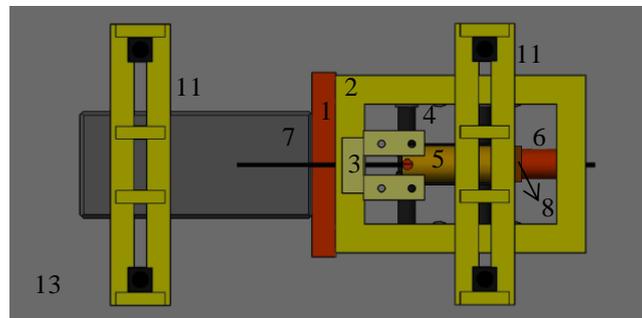
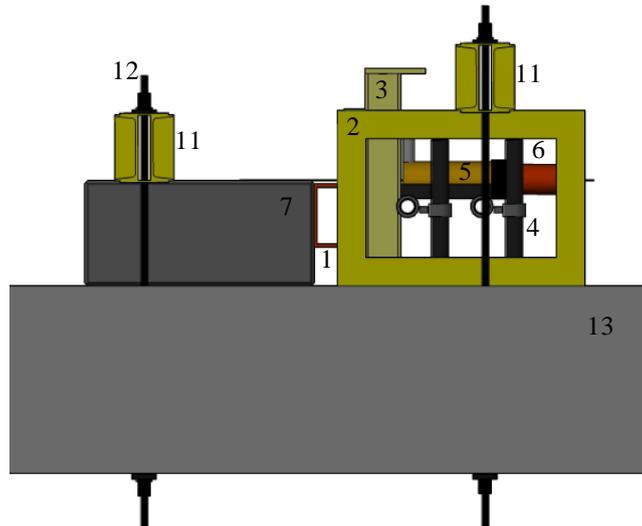
3.4. Sistema de ensaio e instrumentação

Os ensaios experimentais foram todos realizados no laboratório de estruturas do departamento de Engenharia Civil da FCT-UNL. É de referir que a configuração do sistema de ensaio utilizado para a realização dos ensaios de corte simples não é uma configuração padrão, mas sim uma configuração idealizada propositadamente para a realização deste trabalho. O sistema de ensaio foi ainda concebido tendo em consideração as condicionantes técnicas e logísticas do espaço existente.

3.4.1. Técnica EBR

A configuração do sistema de ensaio adotada para realizar os ensaios de corte cuja técnica de colagem foi a EBR permitiu realizar um descolamento estável e controlado, o que é bastante importante para estimar corretamente a força de arrancamento, medir os deslizamentos e extensões durante o ensaio, a Figura 3.11 mostra a configuração adotada.

O bloco de betão é colocado no chão e fica encostado a um elemento de reação de aço com 18 mm de altura e que se encontra a uma altura do chão de 8,5 mm. Este elemento de reação de aço está soldado a uma gaiola de aço. Um perfil de aço está colocado dentro da gaiola para apoiar o cilindro hidráulico. Foram soldados seis tubos metálicos à gaiola de aço, de forma a colocar o cilindro hidráulico à altura desejada. O cilindro hidráulico ENERPAC RCH206 é responsável pela aplicação de força de corte ao sistema. A seguir ao cilindro hidráulico colocou-se uma chapa de aço com uma espessura de 10 mm que serve de reação entre o cilindro hidráulico e o transdutor de força de 200 kN da TML. A seguir ao transdutor de força foi colocada uma chapa de aço de espessura de 10 mm que serve de reação entre o transdutor de força e a cunha colocada no CFRP. Esta cunha é responsável por amarrar o laminado de CFRP, garantindo, assim, que a força é efetivamente aplicada ao laminado de CFRP. As forças são impostas ao sistema através de uma bomba hidráulica que faz o êmbolo do cilindro hidráulico sair. A saída do êmbolo do cilindro hidráulico faz com que a força seja transmitida ao compósito de CFRP.



- | | |
|---|--------------------|
| 1 - chapa/perfil metálico de reação | 8 - chapa metálica |
| 2 - gaiola de aço | 9 - chapa metálica |
| 3 - perfil metálico para apoiar o cilindro hidráulico | 10 - cunha |
| 4 - tubos metálicos | 11 - perfis de aço |
| 5 - cilindro hidráulico | 12 - varões de aço |
| 6 - transdutor de força | 13 - laje |
| 7 - bloco de betão | |

Figura 3.11 – Configuração do ensaio experimental.

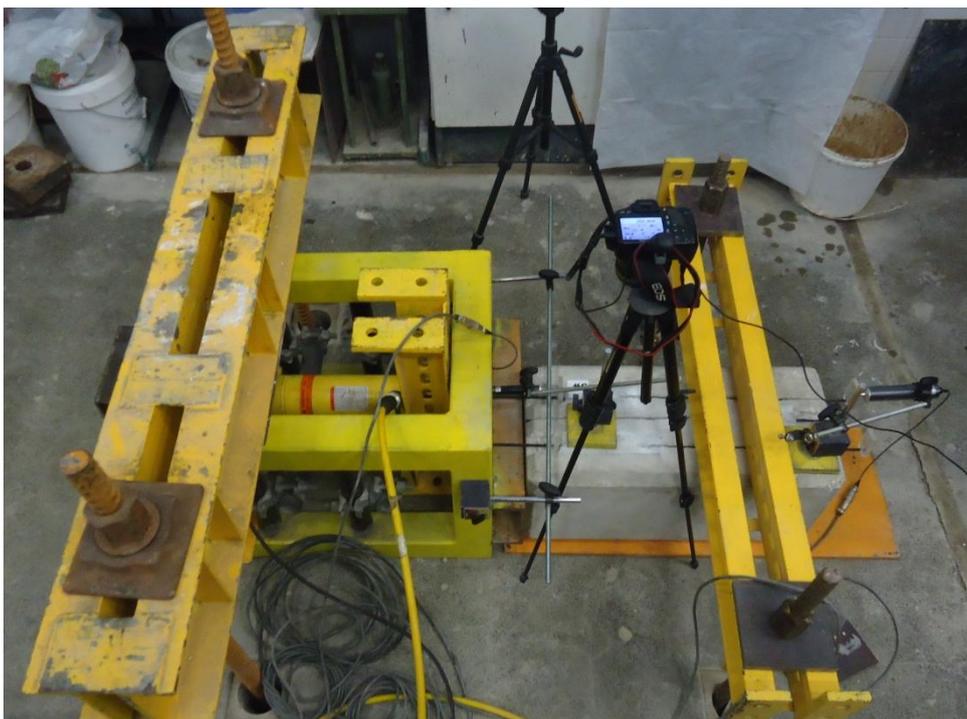


Figura 3.12 - Configuração final do ensaio.

Em todos os ensaios tentou-se que o laminado de CFRP ficasse alinhado em conformidade com o esquema de ensaio inicialmente idealizado.

Foi ainda necessário fixar o sistema de ensaio e o bloco de betão à laje do laboratório. O sistema de ensaio e o bloco de betão foram fixados à laje do laboratório através de perfis de aço e varões, conforme se mostra na Figura 3.11.

A instrumentação do ensaio teve como objetivo obter dados relativamente à força aplicada, ao deslizamento e às extensões durante os ensaios de corte. Para esse efeito, utilizaram-se dois transdutores de deslizamento que mediram os deslizamentos nas extremidades, carregada e livre do laminado de CFRP. É de salientar que o transdutor de deslizamento colocado junto à extremidade carregada do CFRP é do tipo TML-CDP25 com um curso total de 25 mm, sendo o outro transdutor de deslizamento do tipo TLM – CDP50 com um curso total de 50 mm. Para medir os deslizamentos no CFRP com os transdutores foi necessário colar peças de acrílico ao laminado, conforme se mostra na Figura 3.13, colocados paralelamente ao laminado e devidamente centrados.

Foram também colados extensómetros ao longo do comprimento colado de FRP de forma a obter informações relativas à extensão do laminado de CFRP.

A aquisição de dados foi realizada com recurso a um *Datalogger Centipede 100* (UPM100) da HBM. O *software* de aquisição de dados utilizado foi o *Catman 6.0* da HBM. A gravação dos dados foi feita em ficheiros do tipo excel para posterior análise de resultados.

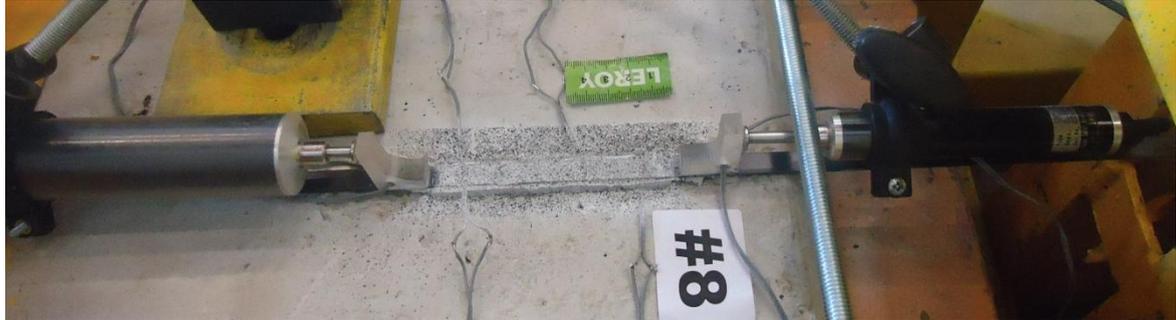


Figura 3.13 - Pormenor da localização dos transdutores de deslizamento.



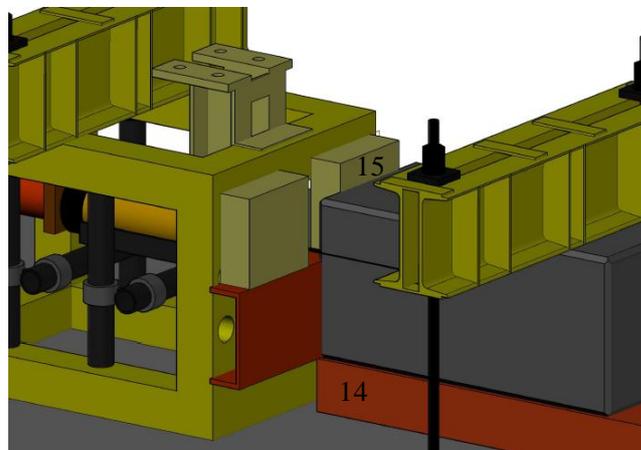
Figura 3.14 – Padrão aleatório criado ao longo do comprimento colado.

Com a colaboração do Departamento de Engenharia Eletrotécnica da FCT-UNL, as amostras foram ainda instrumentadas de forma a conseguir-se utilizar o método de Correlação de Imagem Digital, para aferir os deslizamentos do compósito de CFRP ao longo do ensaio. Este método consiste em tirar sucessivas fotografias, em intervalos previamente estabelecidos, da zona em que o compósito de FRP se encontra colado ao substrato de betão. Estas fotografias são posteriormente analisadas com recurso a programas específicos que permitem medir os deslizamentos de toda a área analisada. No presente trabalho as fotografias foram analisadas através de um programa realizado em Matlab desenvolvido por Almeida [3] e Almeida et al. [2]. Para ser possível utilizar o método de Correlação de Imagem Digital foi necessário criar um padrão aleatório ao longo do comprimento colado, conforme se mostra na Figura 3.14. Foi também utilizada iluminação própria para o efeito tendo-se utilizado um projetor de luz branca, para excluir perturbações cromáticas da superfície analisada. Foi utilizada uma câmara digital Nikon 550D, a qual esta foi colocada, com a

ajuda de um tripé, com a lente perpendicular à face reforçada do bloco de betão armado. Tentou-se que a distância da lente à superfície de betão fosse a menor possível, de forma a obter-se a melhor resolução possível. Ao longo de todos os ensaios, as fotografias foram sendo realizadas em intervalos constantes de 5 segundos.

3.4.2. Técnica NSM

Para a técnica NSM, a configuração do sistema de ensaio adotada é idêntica à da técnica EBR. No entanto, o posicionamento do bloco de betão é diferente. De facto, a face reforçada do bloco de betão não está voltada para cima, tendo-se adotado este posicionamento de modo a que a amarração mecânica realizada pela cunha metálica ficasse sempre posicionada da mesma forma, quer nos ensaios com a técnica EBR quer nos ensaios com a técnica NSM. Mais detalhes sobre esta opção serão apresentados mais adiante. Por conseguinte, foi necessário elevar o bloco de betão armado em 100 mm do chão tendo-se colocado uma chapa de aço de 100 mm de altura por baixo do bloco de betão armado. Como o bloco de betão armado está mais elevado soldou-se uma chapa de aço à gaiola de aço para a face do bloco de betão ficar praticamente toda encostada (veja-se a Figura 3.15). Neste ensaio foi também necessário prender o sistema de ensaio à laje do laboratório.



14 - chapa de aço para elevar o bloco
15 – chapa de aço de reação

Figura 3.15 – Configuração do sistema de ensaio para a técnica NSM.

Para a técnica NSM foram utilizados dois transdutores de deslizamento para medir os deslizamentos nas extremidades, carregada e livre, de CFRP. Para se medir os deslizamentos através dos transdutores de deslizamento colocaram-se peças de acrílico ao laminado nas aberturas

que tinham sido previamente realizadas aquando da abertura dos rasgos, conforme se mostra na Figura 3.17.

Nestes casos, não foi possível colocar extensómetros uma vez que o laminado estava totalmente envolvido por resina, ou seja, os extensómetros teriam que ser colocados entre o laminado e a resina o que poderia afetar a aderência entre o CFRP e o substrato de betão.



Figura 3.16 – Configuração do sistema de ensaio para a técnica NSM.



Figura 3.17 – Pormenor da localização dos transdutores de deslizamento.

O sistema de aquisição de dados e o respetivo *software* utilizados foram os mesmos dos utilizados nos ensaios de corte com a técnica EBR. Para a técnica NSM foram também garantidas as

condições para se recorrer à técnica de Correlação de Imagem Digital. Como neste caso não foi possível utilizar extensómetros, a Correlação de Imagem Digital foi fulcral pois permitiu determinar os deslizamentos no CFRP ao longo do comprimento colado. As condições necessárias para a Correlação de Imagem Digital foram as mesmas que foram utilizadas para a técnica EBR.

Capítulo 4 - Ensaio de corte simples

4.1. Resultados experimentais

O presente capítulo apresenta, para as duas técnicas, EBR e NSM, os resultados experimentais obtidos nos ensaios de corte simples realizados no âmbito do presente trabalho. A Tabela 4.1 apresenta a técnica de colagem, o comprimento de colagem e a designação das várias amostras ensaiadas.

Para as duas técnicas de colagem, os deslizamentos nas extremidades do comprimento colado foram obtidos a partir de dois transdutores de deslizamentos. Para a técnica EBR, as extensões ao longo do comprimento colado foram obtidas a partir da leitura realizados por extensómetros. A partir destas extensões pode calcular-se os deslizamentos, através da equação [6, 7]:

$$s_i = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}}{2} (x_i - x_{i-1}) + s_{i-1} \quad (4.1)$$

onde ε_i e ε_{i-1} são as extensões no compósito obtidas experimentalmente da leitura dos extensómetros; x_i e x_{i-1} são as posições dos extensómetros; e s_i e s_{i-1} são os deslizamentos.

De acordo com [6, 7] as tensões de aderência entre extensómetros consecutivos são determinadas por:

$$\tau = E_f \cdot t_f \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta x} \quad (4.2)$$

onde $\Delta\varepsilon$ é a diferença de extensões entre dois extensómetros consecutivos e Δx o comprimento entre extensómetros.

Para a técnica EBR, foram garantidas as condições para se realizar o método de Correlação de Imagem Digital. No entanto, os dados obtidos por este método não são mostrados no presente

trabalho, uma vez que não se mostraram ser precisos, possivelmente devido a má resolução fotográfica.

Como na técnica NSM não foram utilizados extensómetros, o método de Correlação de Imagem Digital foi fulcral para se obter dados relativos a deformações no compósito de CFRP ao longo do comprimento colado. Através deste método, obtiveram-se os deslizamentos e extensões para vários pontos ao longo do comprimento colado de compósito de CFRP.

Repare-se que, no caso da técnica NSM, existem duas superfícies de FRP coladas, ou seja, existem duas interfaces FRP/betão. Deste modo, pode-se admitir que a interface da técnica NSM é equivalente a duas interfaces como as da técnica EBR, isto é, assumindo metade da espessura do compósito de FRP, como se mostra na Figura 4.1.

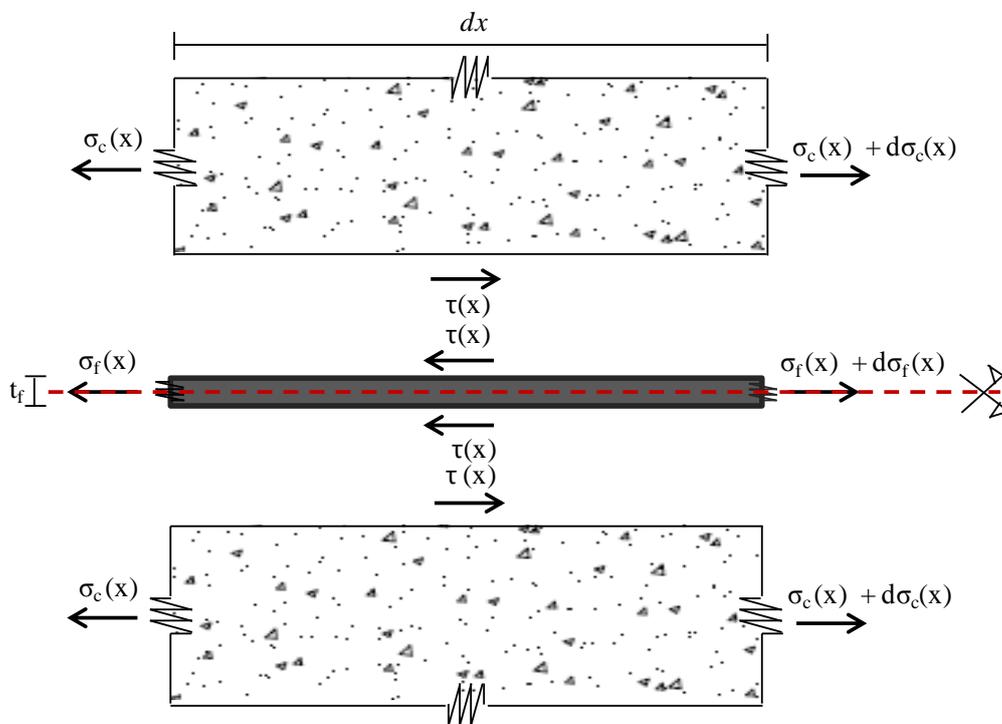


Figura 4.1 – Tensões instaladas na ligação do compósito FRP ao substrato de betão.

Deste modo, a tensão de aderência para a técnica NSM deve ser calculada por:

$$\tau = E_f \cdot \frac{t_f \Delta \varepsilon}{2 \Delta x} \quad (4.3)$$

onde $\Delta \varepsilon$ é a diferença de extensões entre dois pontos consecutivos e Δx o comprimento entre pontos.

Tabela 4.1 – Designação e características das amostras ensaiadas.

Nº do ensaio	Designação	Técnica de colagem	Comprimento colado (L_b) (mm)	Nº repetição do ensaio
1	EBR_300_01	EBR	300	01
2	EBR_150_01	EBR	150	01
3	EBR_150_02	EBR	150	02
4	EBR_300_02	EBR	300	02
5	NSM_200_01	NSM	200	01
6	NSM_050_01	NSM	50	01
7	NSM_100_01	NSM	100	01
8	EBR_100_01	EBR	100	01
9	EBR_050_01	EBR	50	01
10	EBR_150_03	EBR	150	03
11	EBR_100_02	EBR	100	02
12	EBR_300_03	EBR	300	03
13	EBR_050_02	EBR	50	02
14	EBR_300_04	EBR	300	04
15	NSM_150_01	NSM	150	01
16	NSM_100_02	NSM	100	02
17	NSM_050_02	NSM	50	02
18	NSM_050_03	NSM	50	03
19	NSM_200_02	NSM	200	02

As forças transmitidas ao betão para a técnica EBR podem ser calculadas por:

$$F_c(x) = F - \varepsilon(x) \cdot E_f \cdot t_f \cdot b_f \quad (4.4)$$

onde F_c é a força transmitida ao substrato de betão.

Analogamente ao que foi constatado para a tensão de aderência, as forças transmitidas ao substrato de betão para a técnica NSM podem ser calculadas por:

$$F_c(x) = \frac{F - \varepsilon(x) \cdot E_f \cdot t_f \cdot b_f}{2} \quad (4.5)$$

4.1.1. Técnica EBR

Para a técnica EBR, fez-se variar o comprimento de colagem, utilizando-se comprimentos iguais ou superiores ao comprimento efetivo da ligação e comprimentos inferiores ao comprimento efetivo. Para tal, calculou-se, de acordo com a equação do boletim 14 da fib [29], o comprimento efetivo da ligação:

$$L_{eff} = \sqrt{\frac{E_f t_f}{c_2 f_{ctm}}} \quad (4.6)$$

onde c_2 é igual a 2,0 para os laminados de CFRP [29]. Para os parâmetros utilizados no presente estudo obteve-se um comprimento efetivo da ligação de 242,0 mm. Assim, optou-se por utilizar quatro comprimentos diferentes para a técnica EBR, um acima do comprimento efetivo da ligação, 300 mm, e três inferiores, 150 mm, 100 mm e 50 mm.

A Tabela 4.2 apresenta um resumo dos dados mais importantes obtidos nos ensaios experimentais para a técnica EBR realizados neste trabalho. São apresentados dados referentes a força máxima, F_{max} , deslizamento último, s_{ult} , deslizamento máximo, s_{max} , extensão máxima, ε_{max} , e tensão de aderência máxima, τ_{max} . Repare-se que o deslizamento último, s_{ult} , é o deslizamento para o qual ocorre o descolamento e o deslizamento máximo, s_{max} , é o deslizamento correspondente ao valor de tensão de aderência máxima.

4.1.1.1. Amostras com comprimento colado de 300 mm

Nos quatro ensaios realizados para o comprimento colado de 300 mm foram utilizados dois transdutores de deslizamento (defletómetros) nas extremidades, carregada e livre, como se mostra na Figura 4.2. Foram utilizados sete extensómetros ao longo do comprimento colado do compósito de FRP, com um espaçamento constante de 50 mm.

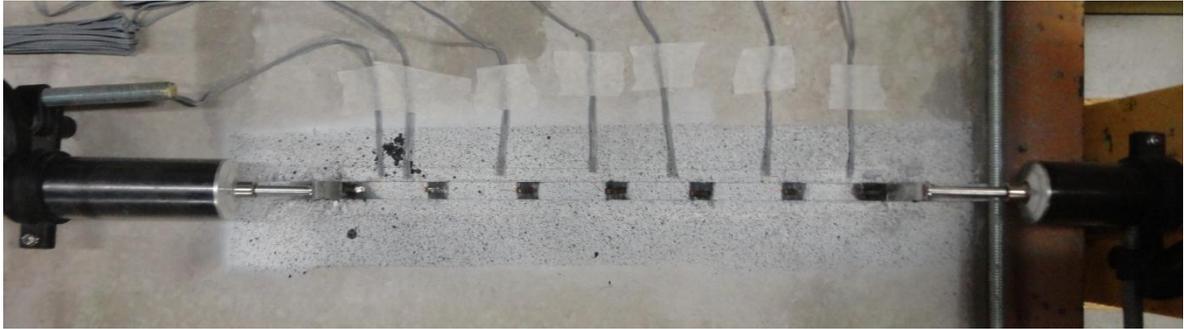


Figura 4.2 – Pormenor da localização dos transdutores de deslizamento e dos extensómetros.

Na Figura 4.3 apresentam-se os gráficos força vs. deslizamento, extensão vs. deslizamento e tensão de aderência vs. deslizamento. Note-se que os deslizamentos mostrados nos gráficos são referentes aos deslizamentos na extremidade carregada, em $x = L_b$.

Tabela 4.2 - Resumo dos dados obtidos para os ensaios realizados pela técnica EBR.

Amostra	F_{max} (kN)	s_{ult} (mm)	s_{max} (mm)	ϵ_{max} (%)	τ_{max} (MPa)
EBR_300_01	8,19	0,140	0,066	0,26	9,79
EBR_300_02	8,81	0,661	0,056	0,38	9,31
EBR_300_03	10,51	0,932	0,471	0,50	4,74
EBR_300_04	8,62	0,642	0,099	0,43	11,44
EBR_150_01	7,77	-	-	-	-
EBR_150_02	9,18	-	-	-	-
EBR_150_03	8,32	0,143	0,080	0,39	18,71
EBR_100_01	6,35	0,154	0,057	0,29	8,35
EBR_100_02	6,88	0,179	0,071	0,31	8,66
EBR_050_01	5,07	0,046	0,016	0,10	4,14
EBR_050_02	5,87	0,267	0,267	0,24	14,92

O gráfico da Figura 4.3(a) mostra que os ensaios EBR_300_01, EBR_300_02 e EBR_300_04 atingiram valores de força máxima da mesma ordem de grandeza, 8,19 kN, 8,81 kN e 8,62 kN, respetivamente. No entanto, o ensaio EBR_300_03 atingiu uma força de 10,51 kN, que é bastante mais elevada que a dos outros três ensaios. Em termos de deslizamento, nota-se que no ensaio EBR_300_01 o deslizamento último foi de 0,140 mm, valor bastante mais pequeno que o dos

outros ensaios. O ensaio EBR_300_03, além de ter uma força bastante superior, regista também um valor superior de deslizamento último, $s_{ult}=0,932$ mm. Os ensaios EBR_300_02 e EBR_300_04 possuem forças, deslizamentos e andamentos muito parecidos.

Quanto às extensões, verifica-se novamente que os ensaios EBR_300_02 e EBR_300_04 atingiram valores de extensões e andamentos bastante próximos, sendo as extensões máximas de 0,38% e 0,43%, respetivamente. O ensaio EBR_300_03 apresenta um valor de extensão máxima um pouco superior, $\epsilon_{max}=0,50$ %, enquanto o ensaio EBR_300_01, além de ter um valor de extensão bastante mais baixo, $\epsilon_{max}=0,26$ %, apresenta também um andamento diferente dos demais ensaios. Verifica-se que, no ensaio EBR_300_01, quando já se estava a impor ao sistema uma força bastante elevada, perto da força de rotura, a extensão teve uma diminuição até ao momento da rotura.

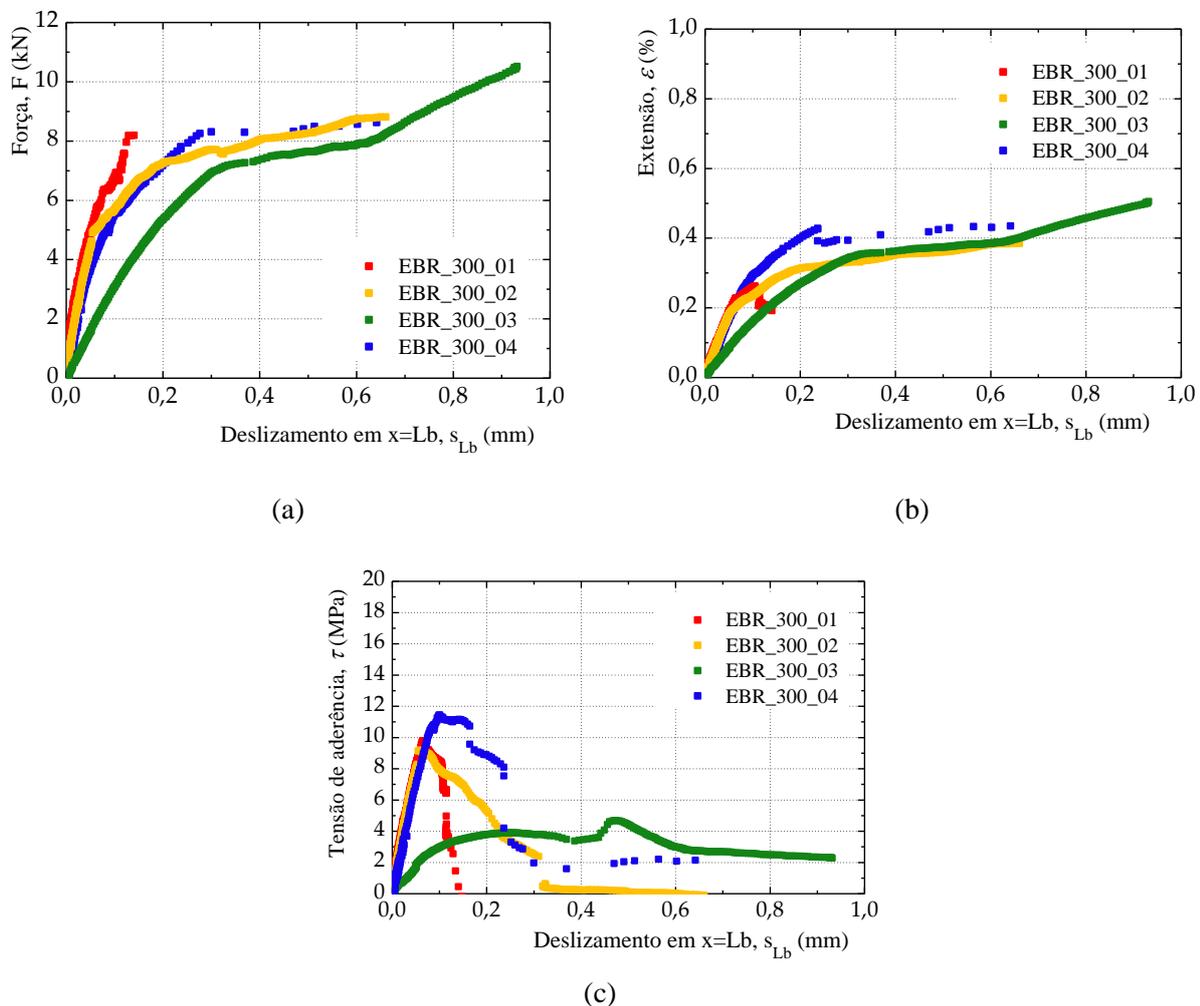


Figura 4.3 – Gráficos força vs. deslizamento, extensão vs. deslizamento e tensão de aderência vs. deslizamento para as amostras com comprimento colado de 300 mm.

Através da observação do gráfico das tensões de aderência (Figura 4.3(c)) constata-se que os ensaios EBR_300_01, EBR_300_02 e EBR_300_04 apresentam andamentos relativamente

parecidos e valores máximos de tensão de aderência próximos. No entanto, o ensaio EBR_300_03 apresenta um andamento bastante diferente dos restantes ensaios e um valor máximo de tensão de aderência bastante inferior aos dos outros três ensaios.

A Figura 4.4 apresenta o gráfico tensão de aderência vs. deslizamento para o ensaio EBR_300_03 em três pontos distintos do comprimento colado. A localização destes pontos pode ser observada na Figura 4.5, sendo o ponto 1 o ponto mais próximo da extremidade carregada. Através da Figura 4.4, observa-se que a curva referente ao ponto 2 apresenta um andamento mais próximo do esperado e apresenta valores bastante superiores aos obtidos no ponto 1. A curva referente ao ponto 3 apresenta um andamento parecido com o da curva 2, com valores de tensão de aderência mais baixos. Através do modo de rotura, observado na Figura 4.5, verifica-se que na zona do ponto 1 a rotura ocorreu pela interface entre o adesivo e o laminado, estando a resina totalmente intacta, enquanto na zona do ponto 2 a rotura ocorreu pelo substrato de betão. Esta diferença no modo de rotura destes dois pontos pode justificar a diferença nas curvas de tensão de aderência vs. deslizamento, a curva do ponto 1 apresenta, provavelmente, um andamento diferente do esperado e valores de tensão de aderência bastante mais pequenos devido a uma má ligação da resina ao laminado.

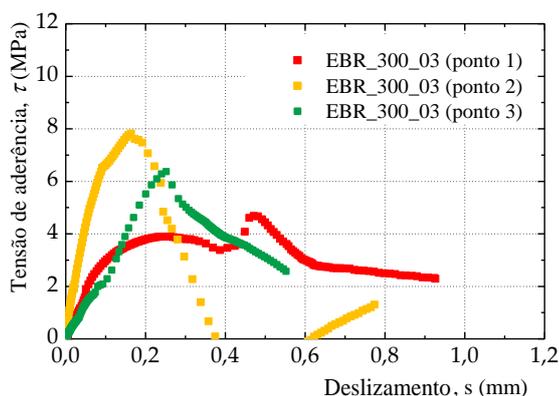


Figura 4.4 – Gráfico tensão de aderência vs. deslizamento para os pontos 1, 2 e 3 do ensaio EBR_300_03.



Figura 4.5 – Modo de rotura do ensaio EBR_300_03 e identificação dos pontos 1 e 2.

As Figuras 4.6 a 4.9 mostram os modos de rotura observados nos quatro ensaios realizados para o comprimento colado de 300 mm. Nos ensaios EBR_300_01 e EBR_300_02 a rotura ocorreu pelo betão, podendo-se observar uma pequena camada de betão agarrada ao compósito. No ensaio EBR_300_03 a rotura pode ser considerada mista, uma vez que parte da rotura ocorreu pelo substrato de betão e outra parte na interface entre o compósito de FRP e o adesivo. A rotura do ensaio EBR_300_04 deu-se pela interface entre o adesivo e o CFRP, denominada por rotura adesiva, ficando uma camada de adesivo intacta em grande parte do comprimento colado.



Figura 4.6 – Modo de rotura da amostra EBR_300_01.



Figura 4.7 - Modo de rotura da amostra EBR_300_02.



Figura 4.8 - Modo de rotura da amostra EBR_300_03.



Figura 4.9 - Modo de rotura da amostra EBR_300_04.

Apenas os ensaios EBR_300_02 e EBR_300_04 serão tidos em conta nas comparações feitas daqui em diante, visto que estes dois ensaios são os que apresentaram valores e andamentos mais próximos para o comprimento colado de 300 mm.

4.1.1.2. Amostras com comprimento colado de 150 mm

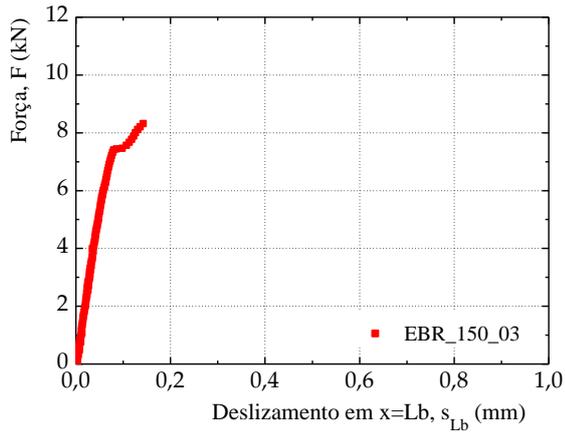
No ensaio EBR_150_03 colocaram-se também dois transdutores de deslizamento (defletómetros) nas extremidades, carregada e livre. Colaram-se quatro extensómetros ao longo do comprimento colado de FRP, com um espaçamento de 50 mm.

Através da Figura 4.10(a), verifica-se que a força máxima obtida para o ensaio EBR_150_03, $F_{\max} = 8,32$ kN, apresenta um valor da mesma ordem de grandeza dos obtidos para o comprimento colado de 300 mm. Verifica-se também que neste ensaio o deslizamento último foi muito inferior aos obtidos para o comprimento colado de 300 mm, tendo-se obtido um deslizamento último de 0,143 mm.

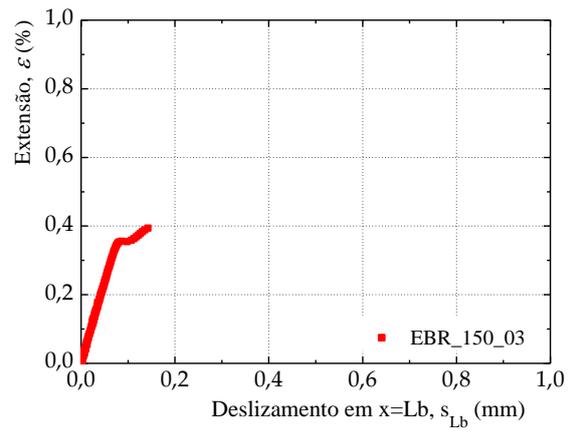
Observa-se também que o valor de extensão máxima, $\epsilon_{\max} = 0,39\%$, é bastante próximo dos valores obtidos para o comprimento colado de 300 mm.

A partir da Figura 4.10(c) verifica-se que o valor de s_{\max} , ou seja, o valor de deslizamento para o qual se obtém o valor de tensão de aderência mais elevado, $s_{\max} = 0,080$ mm, é próximo dos valores obtidos para o comprimento de 300 mm. Em termos de tensão de aderência, verifica-se que os valores foram bastante superiores aos obtidos para um comprimento de 300 mm, obtendo-se uma tensão de aderência máxima de 18.71 MPa, enquanto os valores máximos obtidos para o comprimento de 300 mm andavam entre 9 a 12 MPa.

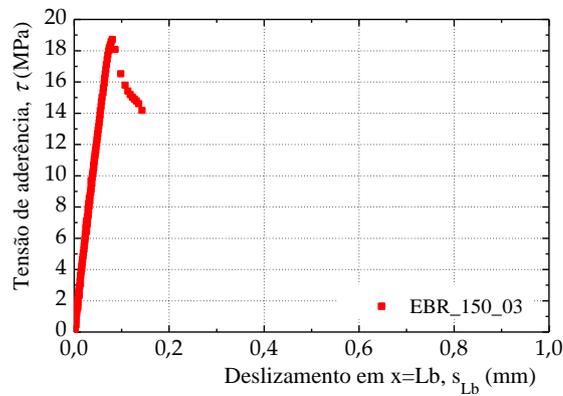
A Figura 4.11 apresenta o gráfico tensão de aderência vs. deslizamento para o ensaio EBR_150_03 em três pontos distintos. A localização destes pontos pode ser observada na Figura 4.12. Através da Figura 4.11 observa-se que a curva referente ao ponto 2 apresenta o mesmo andamento da curva do ponto 1. No entanto, os valores de tensão de aderência são bastante mais pequenos que os da curva 1 e que os obtidos para o comprimento de 300 mm.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.10 - Gráficos força vs. deslizamento, extensão vs. deslizamento e tensão de aderência vs. deslizamento para a amostra EBR_150_01.

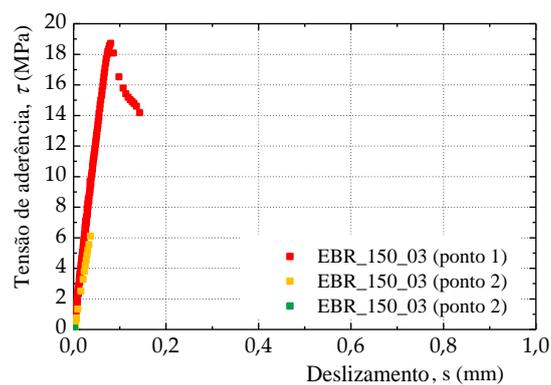


Figura 4.11 - Gráfico tensão de aderência vs. deslizamento para o ponto 1, 2 e 3 do ensaio EBR_150_03.

A Figura 4.12 apresenta o modo de rotura do ensaio EBR_150_03. Neste ensaio verifica-se que a rotura foi do tipo adesiva, visto que a rotura ocorreu na interface entre o adesivo e o compósito de CFRP. O adesivo ficou intacto e o laminado de CFRP ficou sem resíduos de adesivo.

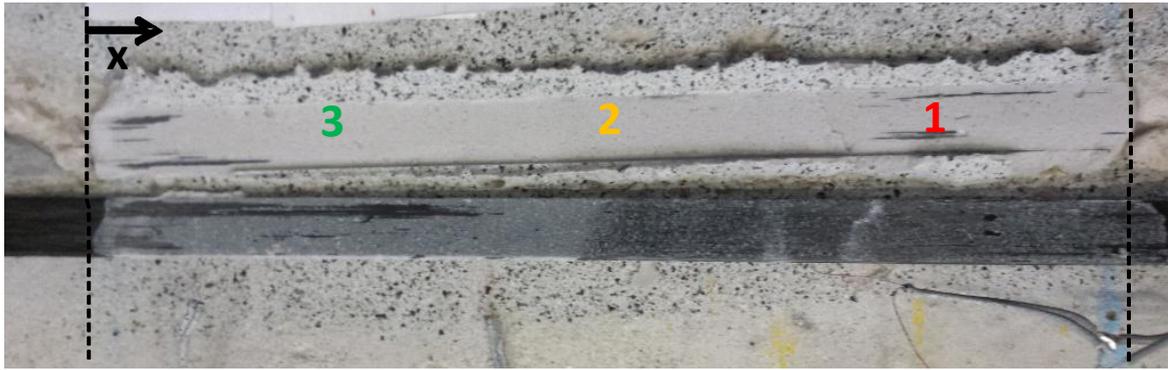


Figura 4.12 - Modo de rotura da amostra EBR_150_03 e localização dos pontos.

Nos ensaios EBR_150_01 e EBR_150_02 não foram utilizados extensómetros, pelo que não se apresentam os dados relativos aos deslizamentos. Assim, nestes dois ensaios apenas se consideram os valores de força máxima, 7,77 kN e 9,18 kN, para o ensaio EBR_150_01 e EBR_150_02, respetivamente.

A Figura 4.13 mostra o modo de rotura obtido para o ensaio EBR_150_01, observando-se que a rotura ocorreu pelo substrato de betão. No entanto, em cerca de 50 mm junto da extremidade livre, a rotura aconteceu entre a resina e a fibra de carbono.



Figura 4.13 – Modo de rotura da amostra EBR_150_01.

A Figura 4.14 apresenta o modo de rotura no ensaio EBR_150_02, que se caracteriza pelo descolamento entre a resina e o CFRP, havendo apenas destacamento de betão em aproximadamente 25 mm perto da zona da extremidade livre.



Figura 4.14 - Modo de rotura da amostra EBR_150_02

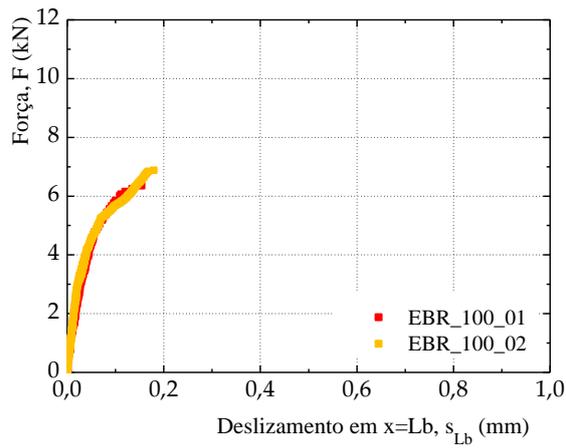
4.1.1.3. Amostras com comprimento colado de 100 mm

A Tabela 4.2 mostra os valores obtidos para os dois ensaios com um comprimento colado de 100 mm. Nestes ensaios foram também colocados dois transdutores de deslizamento nas extremidades, carregada e livre. Foram utilizados quatro extensômetros ao longo do comprimento colado do compósito de FRP para o ensaio EBR_100_01, com espaçamento de aproximadamente 30 mm, e três extensômetros para o ensaio EBR_100_02, com espaçamento de 50 mm.

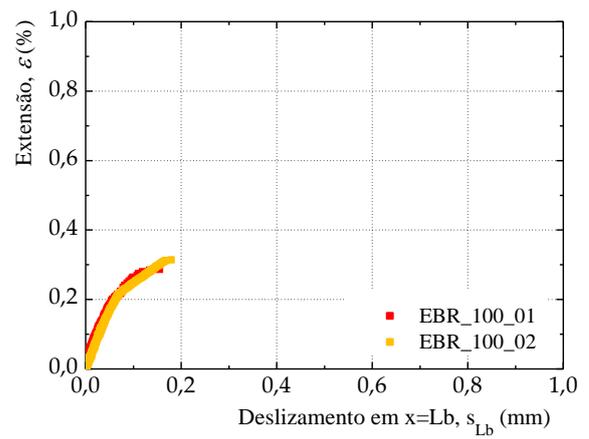
As forças máximas obtidas nos dois ensaios são muito próximas, $F_{\max}= 6,35$ kN e $F_{\max}= 6,88$ kN, para o ensaio EBR_100_01 e EBR_100_02, respetivamente. Verifica-se também que os deslizamentos para os quais se obtêm as forças máximas são próximos, $s_{\text{ult}}=0,154$ mm e $s_{\text{ult}}=0,179$ mm, para o ensaio EBR_100_01 e EBR_100_02, respetivamente.

A extensão máxima do ensaio EBR_100_01, $\epsilon_{\max}=0,29\%$, também é próxima do ensaio EBR_100_02, $\epsilon_{\max}=0,31\%$. Em relação às tensões de aderências máximas, também se observa que têm valores próximos para o ensaio EBR_100_01 e EBR_100_02, $\tau_{\max}=8,35$ MPa e $\tau_{\max}=8,66$ MPa, respetivamente.

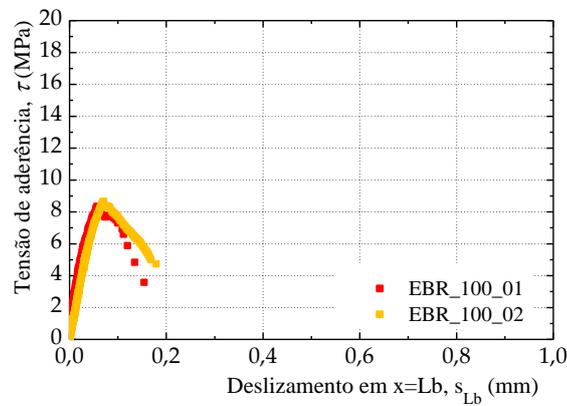
Através da observação dos três gráficos na Figura 4.15, verifica-se que os dois ensaios realizados além de terem valores de força, deslizamentos, extensões e tensões de aderência muito próximos, apresentam também um andamento semelhante. No entanto, os valores máximos de força e extensão são todos inferiores aos obtidos para os comprimentos colados de 300 mm e 150 mm, o que nos leva a concluir que o comprimento colado de 100 mm é inferior ao comprimento efetivo da ligação.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.15 - Gráficos força vs. deslizamento, extensão vs. deslizamento e tensão de aderência vs. deslizamento para as amostras com comprimento colado de 100 mm.

As Figuras 4.16 e 4.17 mostram os modos de rotura obtidos para estes dois ensaios. Observa-se que os modos de rotura também foram idênticos nos dois ensaios, isto é, a rotura ocorreu pelo substrato de betão, ficando uma pequena camada de betão agarrada ao compósito de CFRP.



Figura 4.16 - Modo de rotura da amostra EBR_100_01.



Figura 4.17 - Modo de rotura da amostra EBR_100_02.

4.1.1.4. Amostras com comprimento colado de 50 mm

Nestes ensaios foram também colocados dois transdutores de deslizamento (defletómetros) nas extremidades, carregada e livre. Foram ainda colocados três extensómetros ao longo do comprimento colado do compósito de CFRP com espaçamento de 25 mm entre si.

Através da observação da Figura 4.18, verifica-se que a força máxima obtida no ensaio EBR_050_02, $F_{max}=5,87$ kN, foi um pouco superior à obtida para o ensaio EBR_050_01, $F_{max}=5,07$ kN. Os deslizamentos últimos obtidos para os dois ensaios são muito diferentes, isto é, o ensaio EBR_050_01 atingiu um deslizamento último de 0,046 mm, enquanto o ensaio EBR_050_02 atingiu os 0,267 mm.

A extensão máxima e a tensão de aderência máximas apresentaram valores bastante distintos para os dois ensaios. A extensão máxima obtida para o ensaio EBR_050_01 é de 0,10% e para o EBR_050_02 é de 0,24%. Em termos de tensão de aderência, para o ensaio EBR_050_01

obteve-se um valor máximo de 4,14 MPa e para o EBR_050_02 de 14,92 MPa. O andamento dos gráficos força vs. deslizamento e extensão vs. deslizamento são parecidos. No entanto, o gráfico tensão de aderência vs. deslizamento da Figura 4.18 (c) apresenta um andamento muito diferente para os dois ensaios.

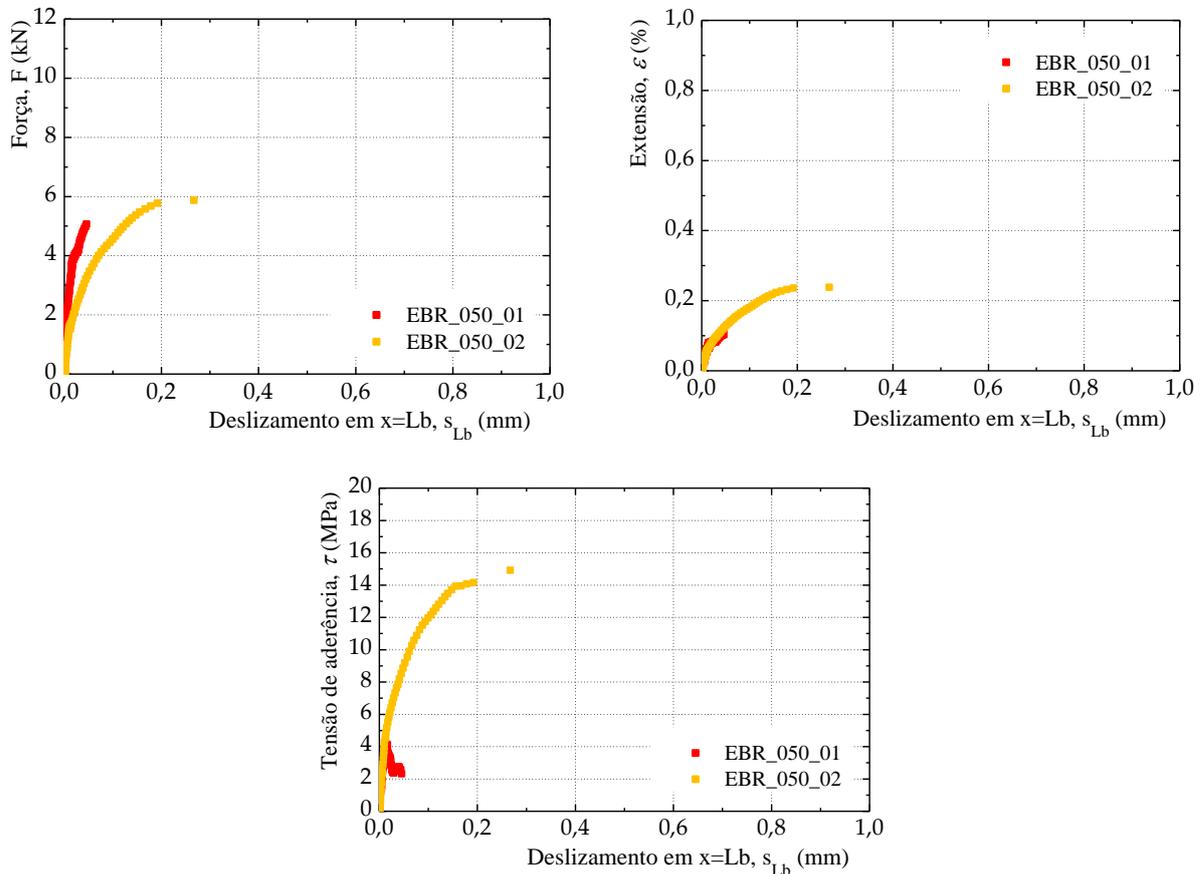


Figura 4.18 - Gráficos força vs. deslizamento, extensão vs. deslizamento e tensão de aderência vs. deslizamento para as amostras com comprimento colado de 50 mm.

Verifica-se que, tal como esperado, a força máxima obtida neste ensaio foi inferior à obtida para o comprimento colado de 100 mm. Verifica-se ainda que o deslizamento último do ensaio EBR_050_01 tem um valor muito baixo quando comparado com os deslizamentos últimos obtidos para o comprimento colado de 100 mm. No entanto, o deslizamento último obtido no ensaio EBR_050_02 foi superior aos obtidos nos ensaios com comprimento de colagem de 100 mm.

Para se tentar perceber e justificar o facto das tensões de aderência do ensaio EBR_050_02 terem valores elevados, mostram-se, na Figura 4.19, as curvas de tensão de aderência vs. deslizamento para dois pontos distintos do comprimento colado, identificados na Figura 4.20. Neste caso, verifica-se que o andamento e os valores de tensões de aderência nos dois pontos são praticamente iguais.

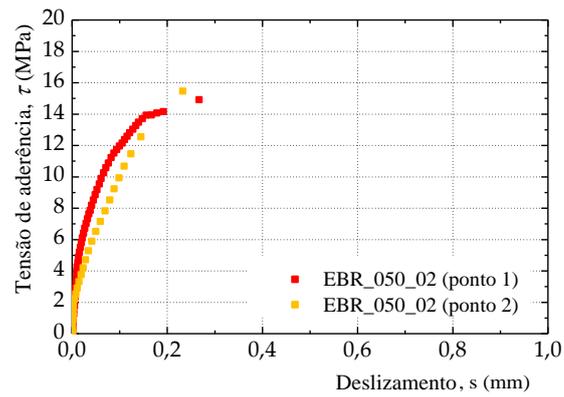


Figura 4.19 - Gráfico tensão de aderência vs. deslizamento para o ponto 1 e 2 do ensaio EBR_050_02.

As Figuras 4.20 e 4.21 apresentam os modos de rotura obtidos nestes dois ensaios. Observa-se que na amostra EBR_050_01 a rotura aconteceu no substrato de betão, enquanto na amostra EBR_050_02 ocorreu na interface entre a resina e o laminado de CFRP.

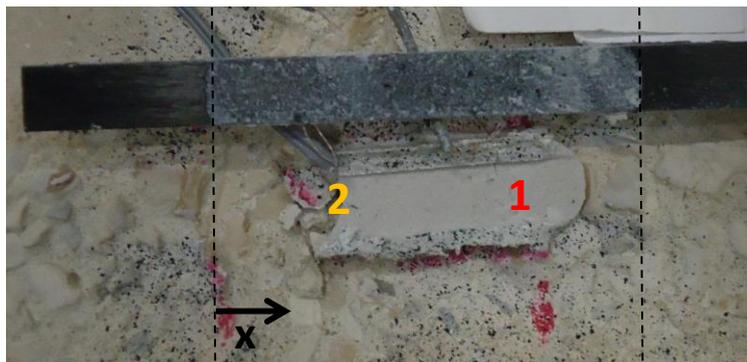


Figura 4.20 - Modo de rotura da amostra EBR_50_02 e localização dos pontos, 1 e 2.



Figura 4.21 - Modo de rotura da amostra EBR_50_01.

4.1.2. Técnica NSM

Para a técnica NSM também se realizaram ensaios de arrancamento com vários comprimentos de colagem diferentes. Tentou-se ter amostras cujos comprimentos de colagem fossem superiores e inferiores ao comprimento efetivo da ligação. Para a técnica NSM, o boletim 14 da fib [29] não propõe expressões para calcular o comprimento efetivo da ligação. Por isso, para este cálculo, recorreu-se ao trabalho de Biscaia et al. artigo [11]. De acordo com [11], as expressões para o comprimento efetivo da ligação para as técnicas EBR e NSM e cuja ligação FRP/betão apresenta uma lei *bond-slip* do tipo rígido com amolecimento linear, são dadas, respetivamente, por:

$$L_{eff\ EBR} = \frac{\pi}{2} \cdot s_{ult} \cdot \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{2 \cdot G_F}} \quad (4.7)$$

$$L_{eff\ NSM} = \frac{\pi}{4} \cdot s_{ult} \cdot \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{G_F}} \quad (4.8)$$

Através das equações (4.7) e (4.8), é possível encontrar a relação entre o comprimento efetivo da ligação da técnica EBR e o comprimento efetivo da ligação da técnica NSM:

$$\frac{L_{eff\ NSM}}{L_{eff\ EBR}} = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.71 \quad (4.9)$$

O comprimento efetivo da técnica NSM é, assim, de cerca de 71% do valor do comprimento efetivo da técnica EBR. Para os parâmetros do presente estudo, estimou-se inicialmente um comprimento efetivo de 171 mm para a técnica NSM.

Por conseguinte, optou-se por utilizar três comprimentos diferentes para esta técnica, um acima do comprimento efetivo, 200 mm, e três inferiores: 150 mm, 100 mm e 50 mm.

Como já foi referido no capítulo anterior, para a técnica NSM não foram utilizados extensómetros e, por isso, o método de Correlação de Imagem Digital foi fulcral para se obter valores de deslizamento ao longo do comprimento de colagem.

A Tabela 4.3 apresenta um resumo dos dados mais importantes obtidos nos ensaios experimentais para a técnica NSM. São apresentados dados referentes à força máxima, F_{max} , deslizamento último, s_{ult} , deslizamento máximo, s_{max} , extensão máxima, ε_{max} , e tensão de aderência máxima, τ_{max} .

Tabela 4.3 - Resumo dos dados obtidos para os ensaios realizados pela técnica NSM.

Amostra	F_{max} (kN)	S_{ult} (deflet.) (mm)	S_{ult} (CID) (mm)	S_{max} (mm)	ϵ_{max} (%)	τ_{max} (MPa)
NSM_200_01	19,07	0,834	-	-	-	-
NSM_200_02	20,99	1,410	1,232	0,330	1,23	17,20
NSM_150_01	15,95	-	0,350	0,191	0,36	9,35
NSM_100_01	20,86	0,226	-	-	-	-
NSM_100_02	19,62	1,014	0,324	0,324	0,30	14,22
NSM_050_01	17,66	-	-	-	-	-
NSM_050_02	12,86	0,602	-	-	-	-
NSM_050_03	9,21	0,207	0,183	0,023	0,25	5,99

Os três primeiros ensaios realizados com a técnica NSM, NSM_200_01, NSM_050_01 e NSM_100_01, foram realizados com a face reforçada do bloco de betão voltada para cima, como se mostra na Figura 4.22. Nenhum destes três ensaios teve uma rotura em conformidade com o que seria espectável, uma vez que nem se conseguiu descolar o compósito de CFRP da superfície de betão. Ao invés, as roturas ocorreram pelo laminado de CFRP devido à disposição adotada na disposição da cunha metálica de amarração do CFRP. Por isso, na análise dos resultados experimentais apenas foram considerados os valores de força máxima obtidos.

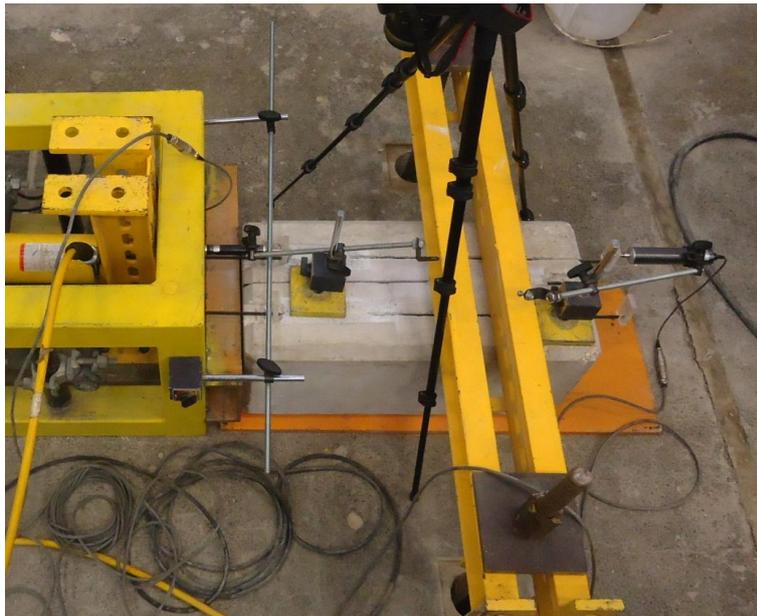


Figura 4.22 - Configuração experimental dos três primeiros ensaios pela técnica NSM.

A Figura 4.23 mostra o laminado de CFRP no final do ensaio NSM_200_01. Através da Figura 4.23(b) e (c), consegue-se ver que o laminado se rompeu na zona livre. Neste ensaio, para cargas mais altas a amarração na cunha não deveria estar a realizar-se da forma mais uniforme possível, podendo haver um diferencial de tensões que levaram ao corte do CFRP ao longo de todo o seu comprimento livre.

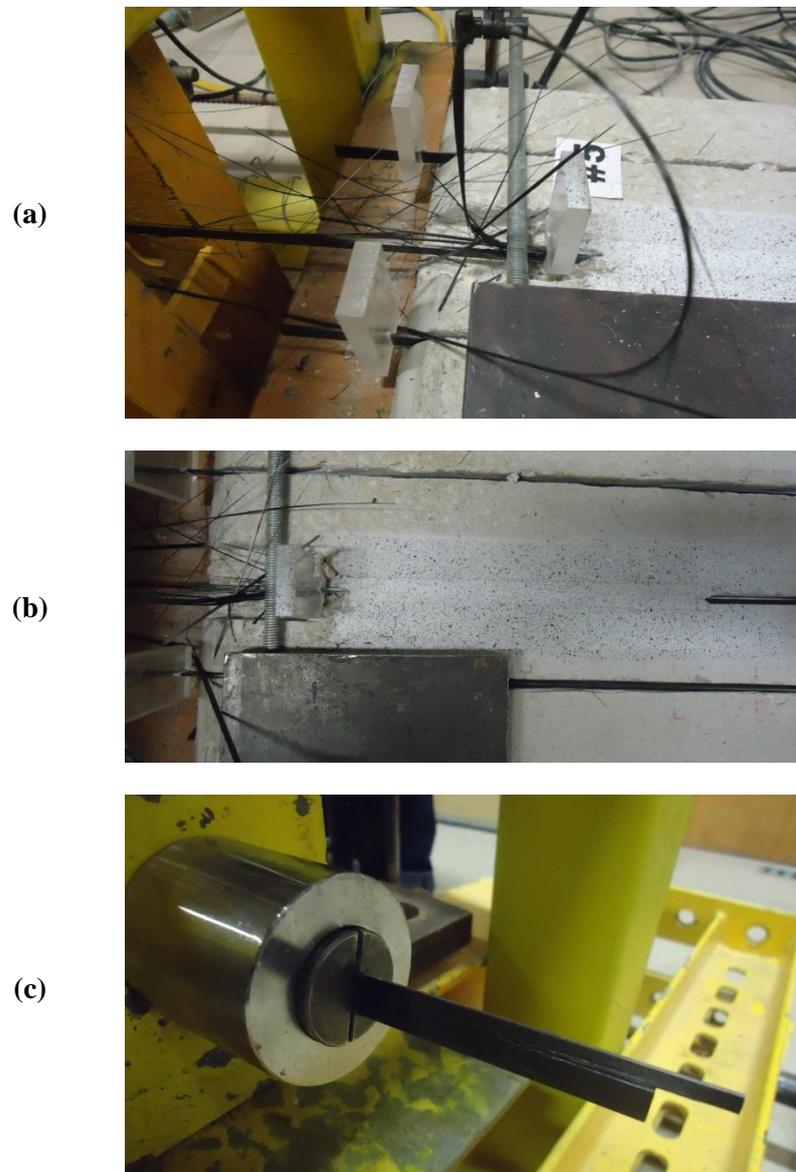


Figura 4.23 - Rotura do ensaio NSM_200_01.

A Figura 4.24 mostra a rotura obtida no ensaio NSM_050_01, verifica-se que aconteceu exatamente o mesmo que no ensaio anterior, o laminado de CFRP rompeu, por corte, ao longo do seu comprimento livre e a zona de colagem permaneceu inalterada.

(a)



(b)



(c)



Figura 4.24 - Ruptura do ensaio NSM_050_01.

A Figura 4.25 mostra a ruptura observada no ensaio NSM_100_01. Neste ensaio, de novo, o laminado de CFRP rompeu, por corte, apenas na zona livre (não colada).

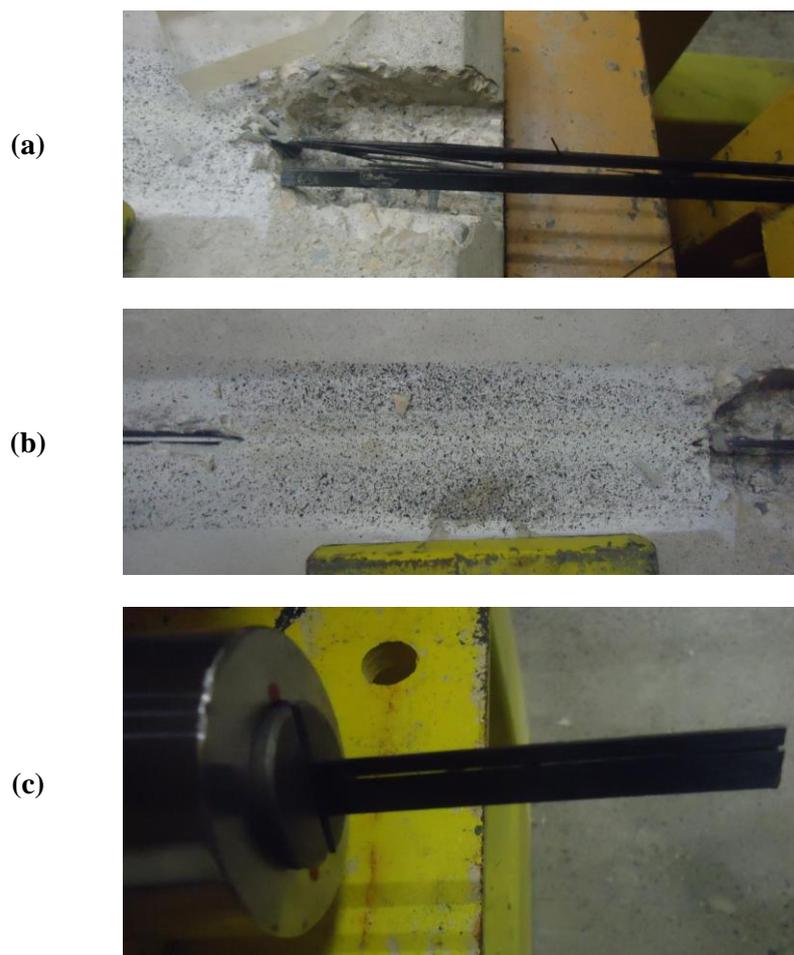


Figura 4.25 - Rotura do ensaio NSM_100_01

Estas roturas no laminado de CFRP podem ficar a dever-se à posição em que a amarração mecânica foi feita no laminado de CFRP e ao peso da cunha de amarração. Esta configuração não permite amarrar o CFRP de forma uniforme, proporcionando gradualmente mais deformações que promovem o corte do CFRP. Por conseguinte, decidiu-se alterar a posição da face reforçada do bloco de betão, ficando a face reforçada virada de lado, conforme se mostra na Figura 4.26. Os ensaios apresentados daqui em diante foram realizados com este posicionamento.

O ensaio NSM_050_02 foi realizado com a configuração mostrada na Figura 4.26. No entanto, o laminado de CFRP também rompeu, por corte, ao longo do seu comprimento livre (veja-se as Figura 4.27(b) e (c)). Esta rotura, apesar da posição do dispositivo de amarração mecânica estar na posição que se pensaria ser mais aceitável, pode ter ocorrido devido a imperfeições de alinhamento entre a superfície colada e o dispositivo de amarração mecânica. Por conseguinte, o arrancamento do CFRP não foi feito e só se considera o valor de força máxima obtida



Figura 4.26 – Configuração final do sistema de ensaio para a técnica NSM.

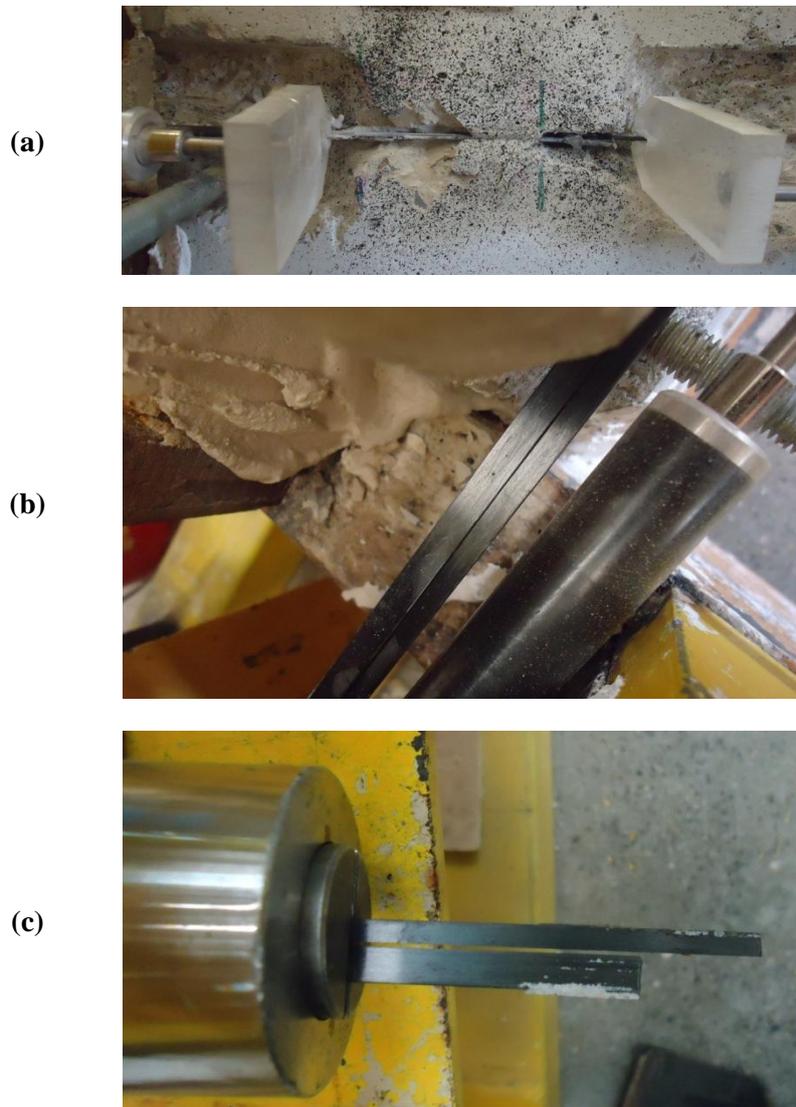


Figura 4.27 - Rotura do ensaio NSM_050_02.

4.1.2.1. Amostra com comprimento colado de 200 mm

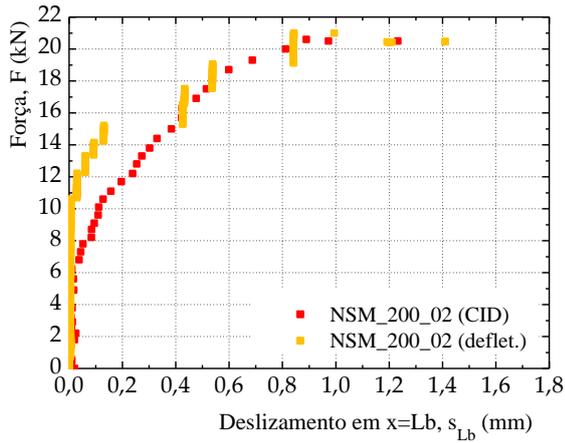
Dos ensaios realizados para um comprimento colado de 200 mm apenas o ensaio NSM_200_02 teve uma rotura consistente com as roturas possíveis de ocorrer numa ligação CFRP/betão. Neste ensaio colocaram-se dois transdutores de deslizamento nas extremidades, carregada e livre, como se apresenta na Figura 4.28, e utilizou-se também o método de Correlação de Imagem Digital (CID).



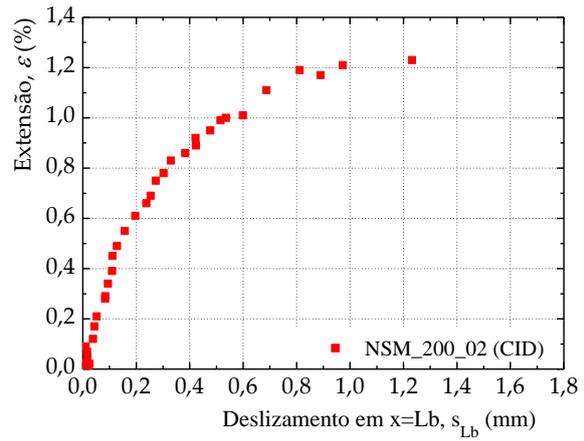
Figura 4.28 - Localização dos transdutores de deslizamento, LVDT1 e LVDT2.

A Figura 4.29 mostra os gráficos força vs. deslizamento, extensão vs. deslizamento e tensão de aderência vs. deslizamento. Note-se que, nestes gráficos, o deslizamento em $x=L_b$ corresponde ao deslizamento obtido junto à extremidade carregada. No gráfico força vs. deslizamento são apresentadas duas curvas, uma referente aos resultados obtidos pelo transdutor de deslizamento, NSM_200_02 (deflet.), e outra obtida pelo método de Correlação de Imagem Digital, NSM_200_02 (CID). Em ambos os casos verifica-se que as curvas têm aproximadamente o mesmo andamento e valores próximos. A força máxima atingiu os 20,99 kN. O deslizamento último obtido pelo método de Correlação de Imagem Digital é $s_{ult}=1,232$ mm e é um pouco inferior ao obtido pelo transdutor de deslizamento, $s_{ult}=1,401$ mm.

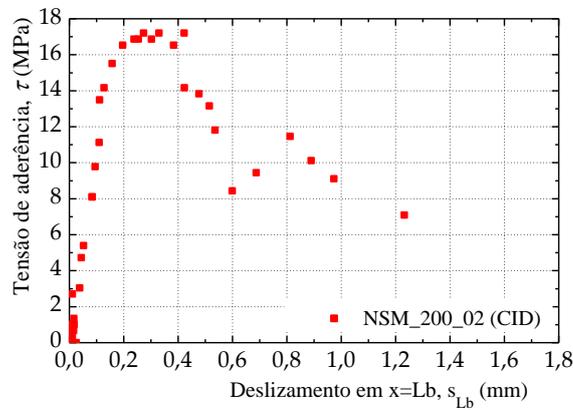
A extensão máxima obtida neste ensaio foi de 1,23 %, e corresponde a uma extensão 16% superior à extensão de rotura do compósito de CFRP obtida experimentalmente por Carvalho [15], 1,03%. O valor máximo da tensão de aderência é de 17,20 MPa e ocorre para um deslizamento máximo de 0,330 mm.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.29 – Gráfico força vs. deslizamento, extensão vs. deslizamento e tensão de aderência vs. deslizamento para o ensaio NSM_200_02.

Na Figura 4.30 mostra-se o modo de rotura observado neste ensaio. Observa-se que a rotura ocorreu pelo substrato de betão, tendo ficado uma pequena camada de betão colada ao compósito de CFRP em ambos os lados. Verificou-se que junto à extremidade carregada houve um maior destacamento de betão na envolvente da ligação do que na extremidade livre..

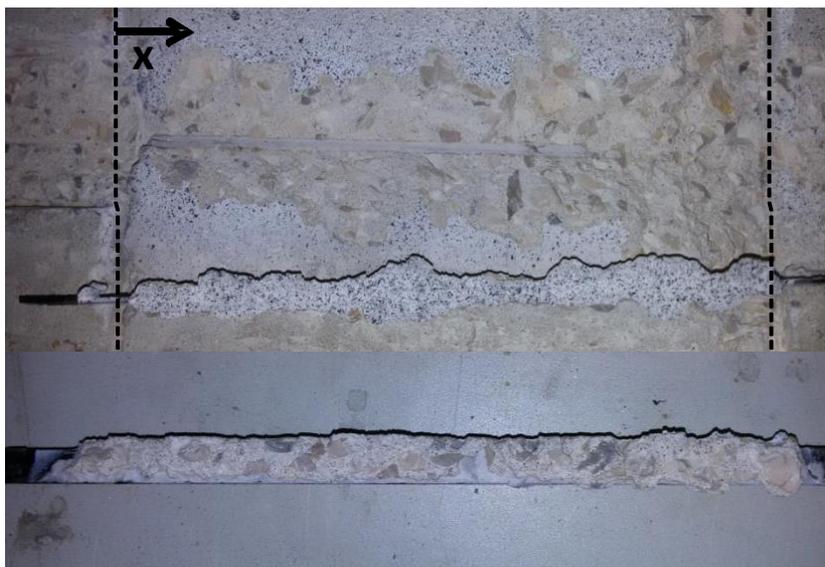


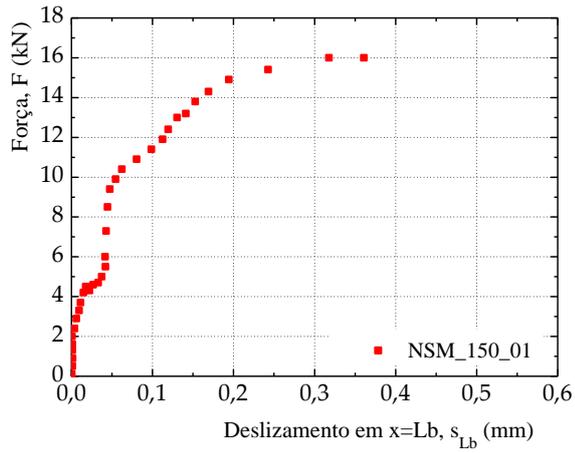
Figura 4.30 - Modo de rotura do ensaio NSM_200_02.

4.1.2.2. Amostra com comprimento colado de 150 mm

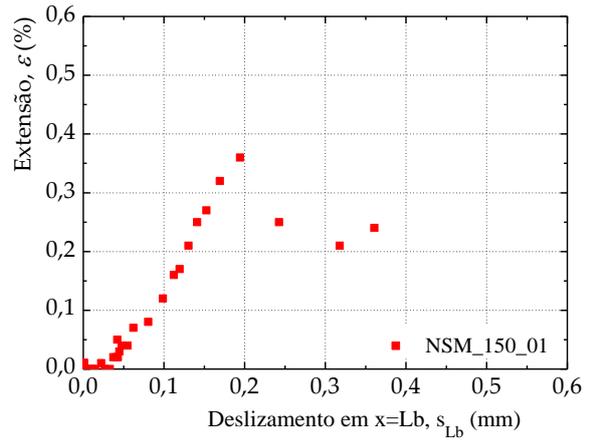
Para o ensaio NSM_150_010 colocaram-se dois transdutores de deslizamento nas extremidades, carregada e livre, e utilizou-se o método de Correlação de Imagem Digital. Neste ensaio não são apresentados dados de deslizamento através dos transdutores de deslizamento, visto que os valores de deslizamento obtidos pelos transdutores de deslizamento foram muito elevados evidenciando, provavelmente alguma acomodação da amostra ao ensaio. Deste modo, para este ensaio serão apenas considerados os valores de deslizamento obtidos pelo método de Correlação de Imagem Digital (CID).

Através da Figura 4.31 (a), observa-se que a força máxima obtida para este ensaio, $F_{\max}=15,98$ kN, é bastante inferior, em cerca de 24%, à obtida para o comprimento de 200 mm, $F_{\max}=20,99$ kN. O deslizamento último obtido para este ensaio, $s_{\text{ult}}=0,350$ mm, também é bastante inferior, em cerca de 73%, aos obtidos para o ensaio NSM_200_02.

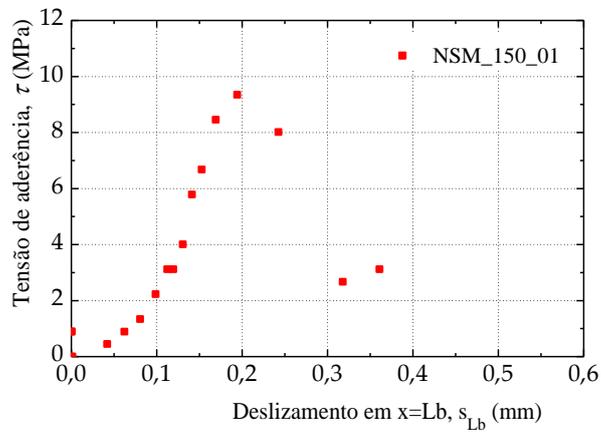
A extensão máxima atingida é de 0,36%. No entanto, verifica-se que este valor não é obtido para o deslizamento último, ou seja, depois de atingido o valor de extensão máxima observa-se que a extensão diminui (veja-se a Figura 4.31(b)). O valor calculado para a tensão de aderência máxima é de 9,34 MPa, o que corresponde a cerca de 54% do valor obtido no ensaio NSM_200_02.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.31 – Gráfico força vs. deslizamento, extensão vs. deslizamento e tensão de aderência vs. deslizamento para o ensaio NSM_150_01.

A Figura 4.32 mostra o modo de rotura obtido para este ensaio. Verifica-se que a rotura ocorreu pelo substrato de betão ao longo de todo o comprimento colado, ficando uma camada significativa de betão agarrada ao laminado de CFRP.

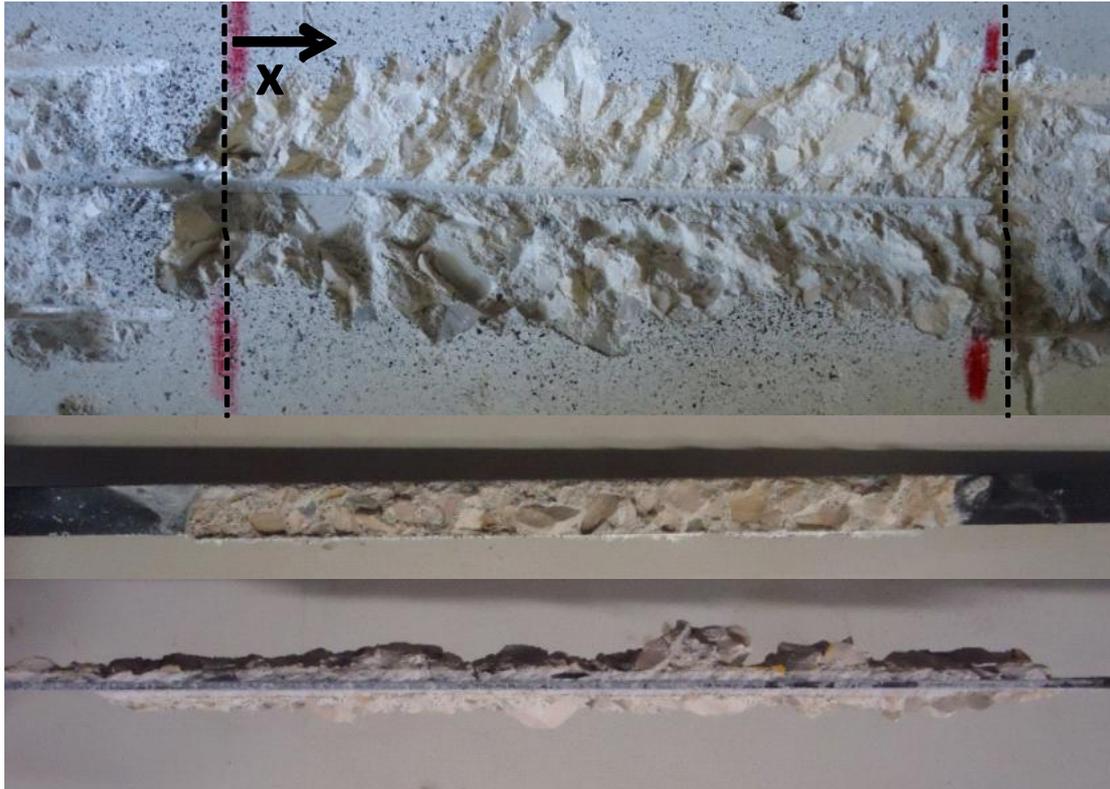


Figura 4.32 – Modo de rotura do ensaio NSM_150_01.

4.1.2.3. Amostra com comprimento colado de 100 mm

Para o comprimento colado de 100 mm pela técnica NSM apenas num dos ensaios se conseguiu obter resultados mais fidedignos, no ensaio NSM_100_02. Neste ensaio colocaram-se dois transdutores de deslizamento nas extremidades e utilizou-se também o método de Correlação de Imagem Digital (CID).

A Figura 4.29 mostra os gráficos força *vs.* deslizamento, extensão *vs.* deslizamento e tensão de aderência *vs.* deslizamento na extremidade carregada, $x=L_b$. O gráfico da Figura 4.33(a) apresenta duas curvas, uma referente aos resultados experimentais obtidos pelo transdutor de deslizamento, NSM_100_02 (deflet.), e outra aos resultados obtidos pela Correlação de Imagem Digital, NSM_100_02 (CID). Observa-se que estas duas curvas têm andamentos e valores de deslizamentos bastante diferentes. O deslizamento último obtido pela correlação Correlação de Imagem Digital, $s_{ult}=0,323$ mm, é bastante inferior ao obtido pelo transdutor de deslizamento, $s_{ult}=1,014$ mm.

Verifica-se também que a força máxima obtida neste ensaio foi da mesma ordem de grandeza da obtida para o comprimento colado de 200 mm. No entanto, o valor da força máxima é 19% superior à do ensaio com comprimento colado de 150 mm. Em termos de deslizamentos,

observou-se que, neste caso, o deslizamento último obtido pela Correlação de Imagem Digital, de 0,323 mm, foi ligeiramente inferior ao obtido para o comprimento colado de 150 mm, $s_{ult}=0,350$ mm.

A extensão máxima obtida neste ensaio foi de 0,30%, valor um pouco inferior ao obtido para o ensaio NSM_150_01. Verifica-se que a extensão não é máxima para o valor de deslizamento último, visto que quando já se estava a impor ao sistema forças mais altas, perto da força de rotura, a extensão medida no CFRP teve uma diminuição até ao momento da rotura. O valor de tensão de aderência máxima é de 14,22 MPa, valor bastante superior, em cerca de 34%, ao obtido para o ensaio NSM_150_01.

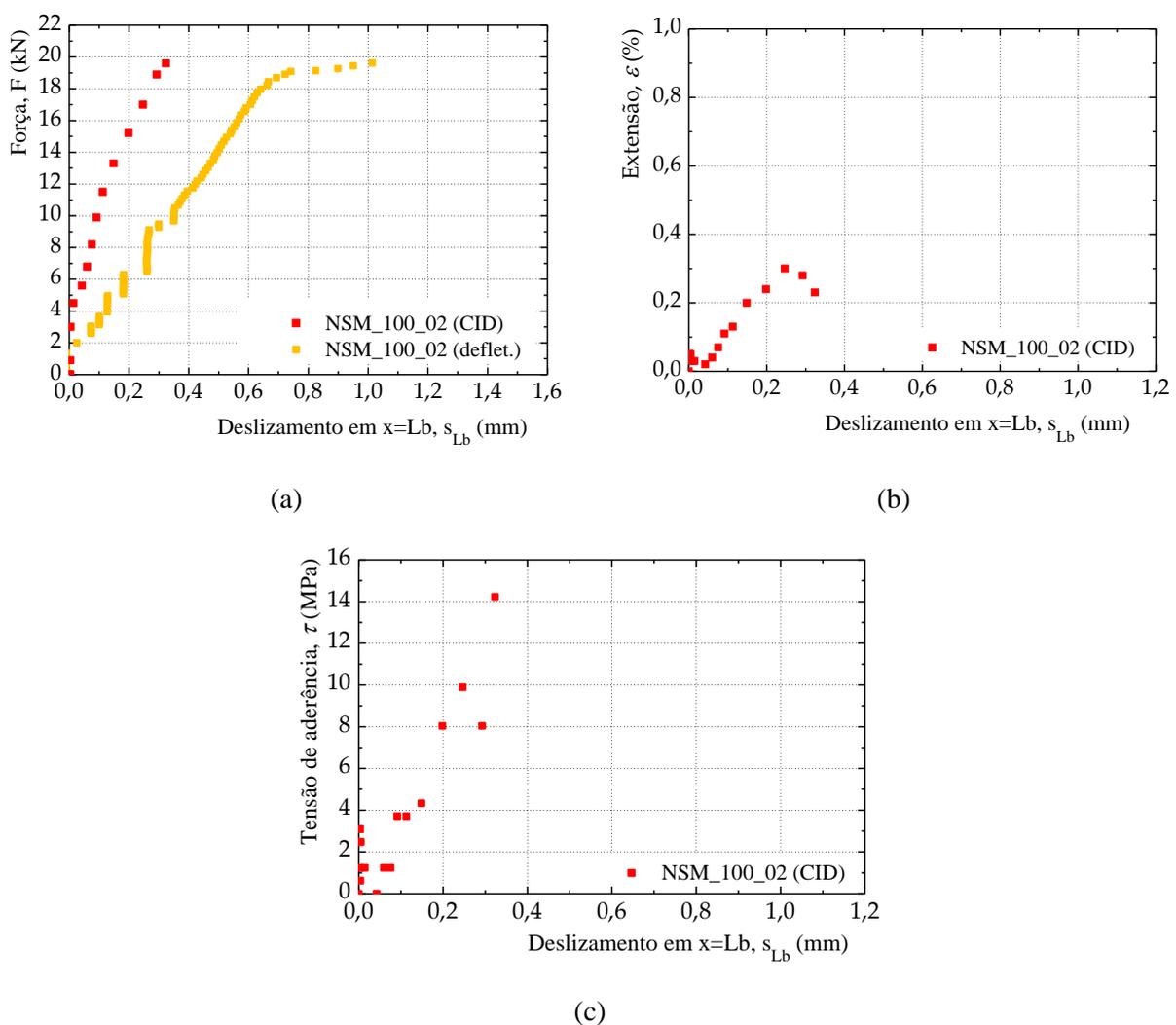


Figura 4.33 - Gráfico força vs. deslizamento, extensão vs. deslizamento e tensão de aderência vs. deslizamento para o ensaio NSM_100_02.

A Figura 4.34 mostra o modo de rotura observado neste ensaio. Observa-se que, tal como nos casos anteriores, a rotura ocorreu pelo substrato de betão, permanecendo uma camada de betão colada ao laminado de CFRP.



Figura 4.34 - Modo de rotura da amostra NSM_100_02.

4.1.2.4. Amostra com comprimento colado de 50 mm

Para o comprimento colado de 50 mm também se verificou que apenas no ensaio NSM_050_03 a rotura foi consistente com as roturas possíveis de ocorrer na ligação CFRP/betão. Neste ensaio, também se colocaram dois transdutores de deslizamento, localizados nas extremidades, e utilizou-se também o método de Correlação de Imagem Digital.

A Figura 4.35 apresenta os gráficos força *vs.* deslizamento, extensão *vs.* deslizamento e tensão de aderência *vs.* deslizamento obtidos para o ensaio NSM_050_03. Tal como nos casos anteriores, o gráfico força *vs.* deslizamento mostra duas curvas, uma referente aos resultados obtidos pelo transdutor de deslizamento, NSM_050_03 (deflet.), e outra obtida pelo método de Correlação de Imagem Digital, NSM_050_03 (CID). É possível ver que as duas curvas têm andamentos quase idênticos. O deslizamento último obtido pela Correlação de Imagem Digital, $s_{ult}=0,183$ mm, é um pouco inferior ao obtido pelo transdutor de deslizamento, $s_{ult}=0,208$ mm.

Observa-se, no gráfico da Figura 4.35(b), que a extensão máxima obtida experimentalmente tem um valor de 0,25%. O valor máximo de tensão de aderência obtido é de 5,99 MPa para um valor de deslizamento de 0,023 mm.

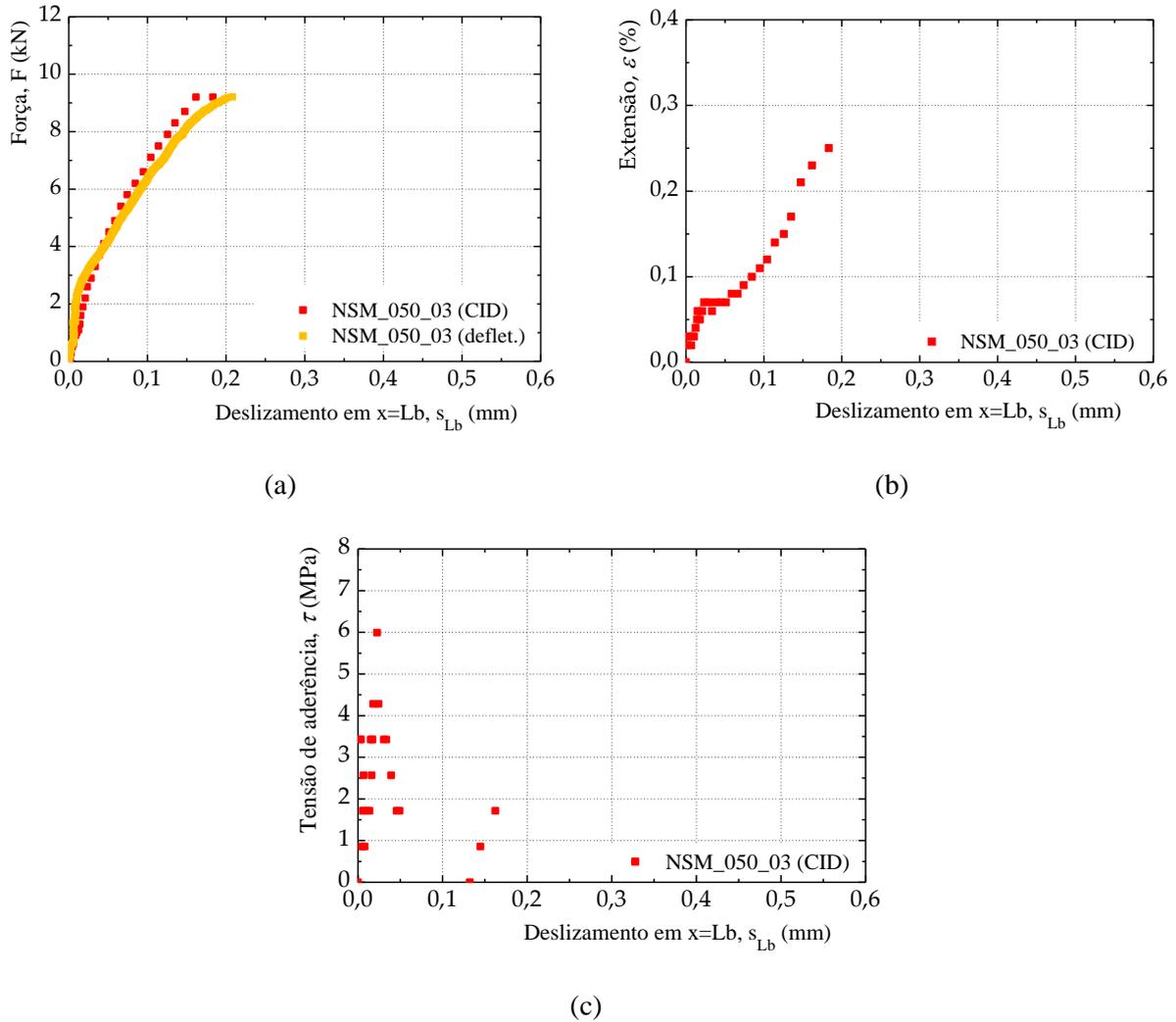


Figura 4.35 – Gráfico força vs. deslizamento, extensão vs. deslizamento e tensão de aderência vs. deslizamento para o ensaio NSM_050_03.

A Figura 4.36 mostra o modo de rotura observado para o ensaio NSM_050_03. Tal como nos casos anteriores, a rotura deu-se pelo substrato de betão, ficando uma camada de betão colada ao compósito. Neste ensaio verificou-se ainda um maior destacamento de betão na envolvente da ligação do CFRP ao betão.

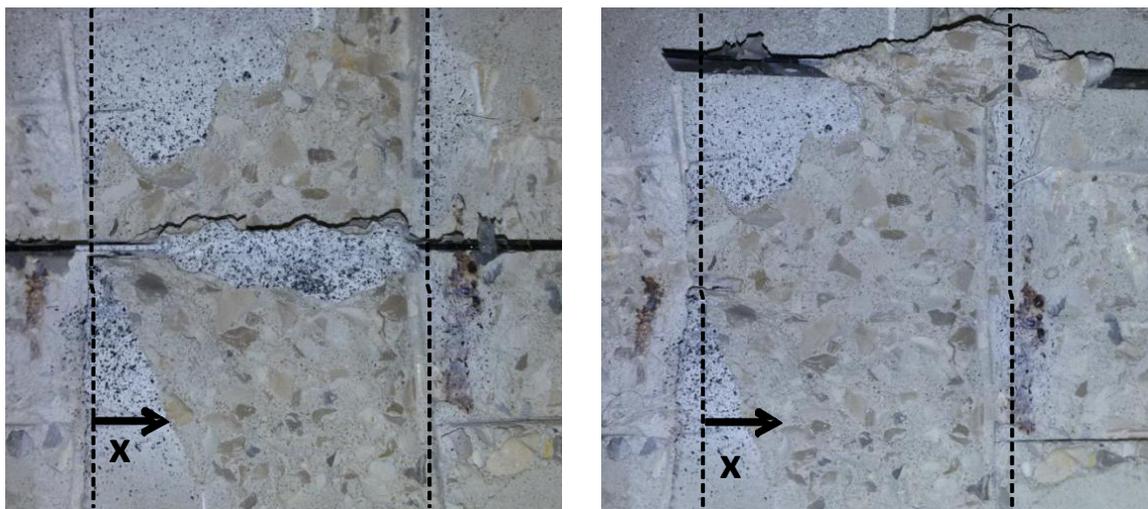


Figura 4.36 - Modo de rotura da amostra NSM_050_03.

4.1.3. Método de Correlação de Imagem Digital

Conforme referido anteriormente, o método de Correlação de Imagem Digital foi utilizado para monitorizar os ensaios de corte simples aferindo os deslizamentos do compósito de CFRP ao longo do ensaio. A partir do método de Correlação de Imagem Digital realizado por Almeida [3], conseguiram-se obter campos de deslizamentos e extensões ao longo do comprimento colado de compósito de CFRP.

A título de exemplo, na Figura 4.37, mostram-se dois dos campos de deslizamento obtidos para a técnica NSM através do método de Correlação de Imagem Digital realizado por Almeida [3]. Note-se que estes campos de deslizamentos foram obtidos para a força máxima, ou seja, para a última fotografia existente antes da rotura do sistema de reforço. Os dois campos de deslizamento dizem respeito aos deslizamentos obtidos para dois comprimentos diferentes, 200 mm e 50 mm. Nos campos de deslizamento da Figura 4.37, a extremidade carregada do laminado de CFRP corresponde à extremidade inferior dos dois campos de deslizamento.

Observa-se, através da Figura 4.37, que para os dois comprimentos o aspeto dos campos de deslizamentos é muito parecido e os deslizamentos junto da extremidade carregada são mais elevados e vão diminuindo até à extremidade livre. Observa-se ainda que a gama de valores de deslizamentos para o comprimento colado de 200 mm é muito superior à obtida para o comprimento colado de 50 mm.

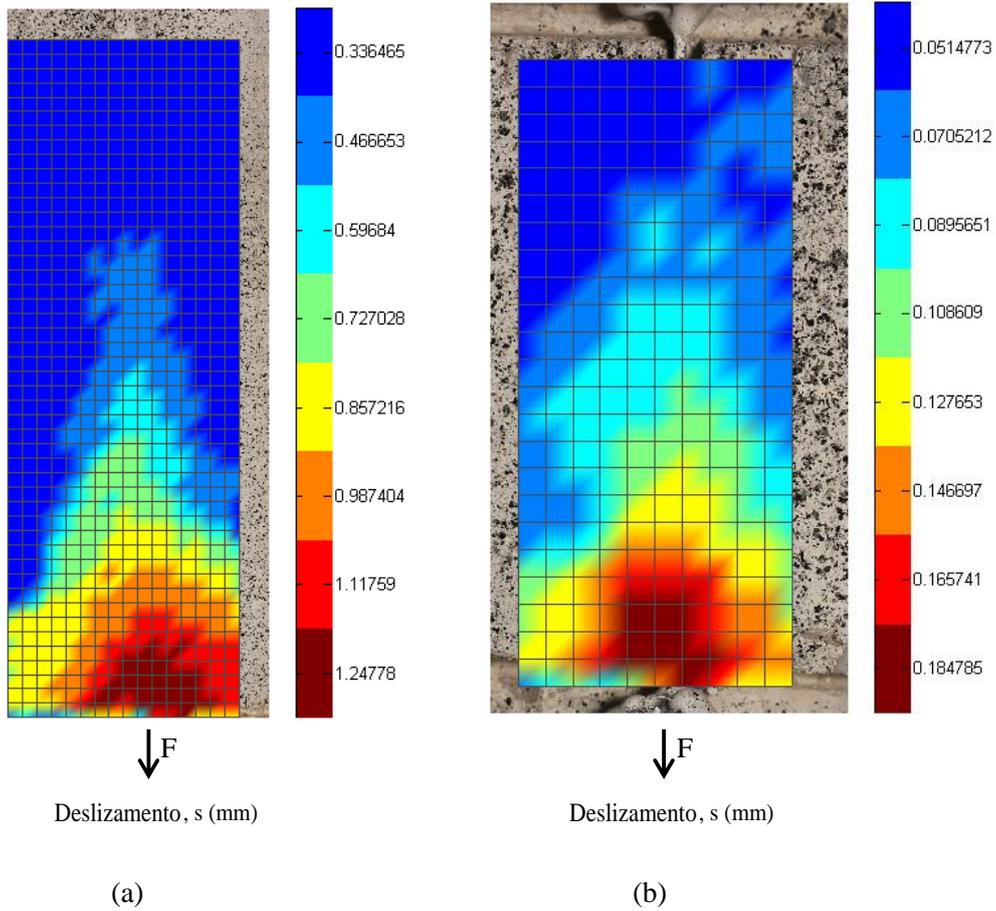


Figura 4.37 – Campos de deslocamentos obtidos pela Correlação de Imagem Digital (CID) para dois comprimentos: (a) 200 mm; e (b) 50 mm.

Capítulo 5 - Modelo analítico proposto

5.1. Introdução

Conforme referido anteriormente, o descolamento prematuro dos compósitos de FRP do substrato a reforçar é um dos maiores problemas que os sistemas de reforço por colagem apresentam e, por isso, tem sido bastante estudado. É, por conseguinte, importante conhecer com rigor o desempenho da interface FRP-betão. Atualmente, não se conhecem soluções analíticas não lineares exatas que consigam descrever, com rigor, o processo de descolamento completo da interface entre um compósito de FRP e o substrato a reforçar.

Um dos objetivos do presente estudo é propor um modelo analítico não-linear que consiga descrever com rigor todo o processo de descolamento da interface entre o FRP e o substrato de betão e que seja válido para qualquer comprimento colado. Esta solução analítica baseia-se num modelo *bond-slip* não-linear do tipo exponencial. Quando comparados com os modelos *bond-slip* lineares os modelos *bond-slip* não-lineares conseguem aproximar melhor as soluções analíticas aos processos de descolamento reais. É de salientar que o modelo proposto é válido tanto para a técnica EBR como para a técnica NSM. Este modelo proposto é ainda válido para qualquer comprimento colado independentemente deste ser maior ou menor que o comprimento efetivo de ligação.

A novidade deste modelo analítico reside no facto que se assume uma curva local *bond-slip* não-linear proposta por Dai et al. [19], já abordada no subcapítulo 2.8.2., e simula todo o processo de descolamento da ligação CFRP/betão. Não se conhecem, até agora, outras soluções analíticas similares encontradas, no entanto, existem soluções numéricas com base nesta e noutras curvas *bond-slip* não-lineares [11, 27].

Neste subcapítulo apresenta-se as deduções do modelo bem como todas as expressões que permitem estimar os deslizamentos e as extensões no compósito de FRP, as tensões de aderência na interface e as forças transmitidas ao betão armado. São discutidas também expressões para calcular a força máxima.

5.2. Técnica EBR

Relembrando que a equação de equilíbrio da ligação FRP/betão é:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} - \lambda^2 \cdot \tau(s) = 0 \quad (5.1)$$

Em que:

$$\lambda^2 = \frac{1}{E_f \cdot t_f} + \frac{b_f}{E_c \cdot t_c \cdot b_c} \quad (5.2)$$

e assumindo a lei *bond-slip* exponencial proposta por Ueda e Dai [19]:

$$\frac{\tau(s)}{\tau_{max}} = 4 \cdot (e^{-\ln(2) \cdot \frac{s}{s_{max}}} - e^{-2 \cdot \ln(2) \cdot \frac{s}{s_{max}}}) \quad (5.3)$$

ao introduzir a equação (5.3) em (5.1) resulta:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} = \frac{2BG_f}{t_f} \left(\frac{1}{E_f} + \frac{b_f t_f}{E_c t_c b_c} \right) (e^{-Bs} - e^{-2Bs}) \quad (5.4)$$

Reconhecendo que

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} = \frac{d}{dx} \left(\frac{ds}{dx} \right) = \frac{d}{ds} \left(\frac{ds}{dx} \right) \frac{ds}{dx} = \frac{1}{2} \frac{d}{ds} \left(\frac{ds}{dx} \right)^2 \quad (5.5)$$

e substituindo na equação (5.4) tem-se:

$$\left(\frac{ds}{dx} \right)^2 = \int \frac{4BG_f}{t_f} \left(\frac{1}{E_f} + \frac{b_f t_f}{E_c t_c b_c} \right) (e^{-Bs} - e^{-2Bs}) ds \quad (5.6)$$

e integrando a equação (5.6):

$$\frac{ds}{dx} = \sqrt{\frac{2BG_f}{t_f} \left(\frac{1}{E_f} + \frac{b_f t_f}{E_c t_c b_c} \right) \cdot (1 - e^{-Bs})^2 + C_1} \quad (5.7)$$

onde C_1 é uma constante.

Admitindo que na extremidade livre a extensão é nula e o deslizamento é um deslizamento qualquer s_0 , as condições de fronteira são dadas por:

$$\varepsilon(x = 0) = \frac{ds(x = 0)}{dx} = 0 \text{ e } s(x = 0) = s_0 \quad (5.8)$$

Note-se que, ao impor-se como condição de fronteira na extremidade livre o deslizamento poder tomar um valor qualquer diferente de zero, as expressões determinadas a seguir são válidas para qualquer comprimento colado. Note-se que, para comprimentos muito grandes, s_0 poderá tomar valores muito pequenos desde que não se torne zero. A partir das condições de fronteira (5.8), a constante C_1 é:

$$C_1 = -D^2 \cdot (1 - e^{-Bs_0})^2 \quad (5.9)$$

onde o parâmetro D é dado por:

$$D = \sqrt{\frac{2G_f}{t_f} \cdot \left(\frac{1}{E_f} + \frac{b_f t_f}{E_c t_c b_c} \right)} \quad (5.10)$$

Como $1/E_f \cdot t_f \gg b_f/(E_c \cdot t_c \cdot b_c)$, a equação (5.10) é igual à equação (2.40), ou seja, $D=A$.

A equação (5.7) pode ser escrita sob a forma:

$$\int \frac{ds}{\sqrt{(1 - e^{-Bs})^2 - (1 - e^{-Bs_0})^2}} = \int D dx \quad (5.11)$$

E integrando, obtém-se:

$$\frac{\ln \left[\frac{2\sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2} \cdot \sqrt{(1 - e^{-Bs})^2 - (1 - e^{-Bs_0})^2} \cdot e^{Bs} + 2[1 - (1 - e^{-Bs_0})^2] \cdot e^{Bs} - 2}{B \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2}} \right]}{B \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2}} = D \cdot x + C_2 \quad (5.12)$$

onde C_2 é uma constante.

Reconhecendo que, no domínio dos deslizamentos no descolamento da interface entre o FRP e o substrato a reforçar, a segunda raiz quadrada da equação (5.12) pode ser aproximada por:

$$\sqrt{(1 - e^{-Bs})^2 - (1 - e^{-Bs_0})^2} \approx \sqrt{(1 - e^{-Bs})^2} \quad (5.13)$$

fica:

$$\begin{aligned} & \frac{\ln \left[2\sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2} \cdot \sqrt{(1 - e^{-Bs})^2} \cdot e^{Bs} + 2[1 - (1 - e^{-Bs_0})^2] \cdot e^{Bs} - 2 \right]}{B \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2}} \\ & = D \cdot x + C_2 \end{aligned} \quad (5.14)$$

Desenvolvendo a equação (5.14) obtém-se a expressão do deslizamento ao longo do comprimento colado:

$$s(x) = \frac{1}{B} \ln \left(\frac{e^{(D \cdot x + C_2) \left(B \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2} \right)} + 2 + 2\sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2}}{\left(2\sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2} + 2[1 - (1 - e^{-Bs_0})^2] \right)} \right) \quad (5.15)$$

Considerando-se a condição de fronteira

$$s(x = 0) = s_0 \quad (5.16)$$

é possível determinar a constante C_2 :

$$\begin{aligned} & C_2 \\ & = \frac{\ln \left(e^{B \cdot s_0} \cdot \left(2\sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2} + 2[1 - (1 - e^{-Bs_0})^2] \right) - 2 - 2\sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2} \right)}{\left(B \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2} \right)} \end{aligned} \quad (5.17)$$

Note-se, novamente, que não é possível determinar a constante C_2 quando o deslizamento na extremidade livre, $s=s_0$, é exatamente igual a zero, devendo-se assumir quando necessário um valor de s_0 muito pequeno.

Substituindo agora a equação (5.15) em (5.7) obtém-se o campo de extensões no compósito de FRP.

$$\begin{aligned} & \frac{ds}{dx} = \varepsilon(x) \\ & = D \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{2\sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2} + 2[1 - (1 - e^{-Bs_0})^2]}{e^{(D \cdot x + C_2) \left(B \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2} \right)} + 2 + 2\sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2}} \right)^2 - (1 - e^{-Bs_0})^2} \end{aligned} \quad (5.18)$$

A expressão das tensões de aderência pode agora ser obtida substituindo a equação (5.15) em (2.37):

$$\tau(x) = 2B \cdot G_f \cdot \left[\frac{2\sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2} + 2[1 - (1 - e^{-Bs_0})^2]}{e^{(D \cdot x + C_2) \left(B \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2} \right)} + 2 + 2\sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2}} - \left(\frac{2\sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2} + 2[1 - (1 - e^{-Bs_0})^2]}{e^{(D \cdot x + C_2) \left(B \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2} \right)} + 2 + 2\sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2}} \right)^2 \right] \quad (5.19)$$

5.3. Técnica NSM

Procedendo-se de forma análoga à utilizada para a técnica EBR, as expressões de deslizamento e extensões no compósito e de tensões de aderência na interface entre o FRP e o substrato a reforçar podem ser determinadas. A equação governativa para a técnica NSM com laminados de secção retangular é [11]:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} - \frac{2 \cdot \tau(s)}{E_f \cdot t_f} = 0 \quad (5.20)$$

Sendo que no caso da técnica NSM com varões de secção circular a equação governativa é [11]:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} - \frac{4 \cdot \tau(s)}{E_f \cdot \emptyset_f} = 0 \quad (5.21)$$

onde \emptyset_f é o diâmetro do varão de FRP.

A formulação teórica apresentada anteriormente para a técnica EBR pode ser aplicada para a técnica NSM, fazendo ajustar apenas o parâmetro D da equação (5.10). Assim, no caso dos laminados de FRP de secção retangular:

$$D = \sqrt{\frac{4G_f}{t_f} \left(\frac{1}{E_f} + \frac{b_f t_f}{E_c t_c b_c} \right)} \quad (5.22)$$

e no caso dos varões circulares:

$$D = \sqrt{\frac{8G_f}{\emptyset_f} \left(\frac{1}{E_f} + \frac{\pi \cdot \emptyset_f^2}{4E_c t_c b_c} \right)} \quad (5.23)$$

5.4. Força máxima transmitida ao compósito FRP:

A resistência de um sistema de reforço com compósitos de FRP depende do comprimento colado, sendo também que a força máxima é atingida para um comprimento colado igual ou superior ao comprimento de ligação efetivo ($L_b \geq L_{eff}$). A força máxima transmitida ao reforço pode ser determinada a partir da equação (5.18) admitindo um comprimento colado infinito. Para isso, o deslizamento na extremidade livre, em $x=0$, deve ser assumido como nulo, $s_0=0$, e para um comprimento colado infinito ($x \rightarrow \infty$) a raiz quadrada na equação (5.18) tende para a unidade. Assim, a expressão da força máxima resulta:

$$F_{max} = b_f \cdot \sqrt{2G_f \cdot E_f \cdot t_f} \quad (5.24)$$

que é igual à fórmula normalmente utilizada na literatura [8, 9, 19] para determinar a força máxima transmitida ao reforço. Também pode ser determinada, de forma análoga, uma fórmula para a força máxima para o caso da técnica NSM. Assim, na técnica NSM com laminados de secção retangular tem-se:

$$F_{max} = 2b_f \cdot \sqrt{G_f \cdot E_f \cdot t_f} \quad (5.25)$$

e para os varões circulares:

$$F_{max} = \pi \cdot \Phi_f \cdot \sqrt{G_f \cdot E_f \cdot R_f} \quad (5.26)$$

Tal como no caso da técnica EBR, as equações (5.25) e (5.26) são iguais às apresentadas noutros estudos, como por exemplo em [8, 19, 28] que consideram modelos *bond-slip* lineares, o que comprova que o tipo de curva *bond-slip* não influencia o cálculo da força máxima.

Para o caso de comprimentos colados menores que o comprimento efetivo da ligação, as expressões anteriores não são válidas. Para este caso é comum introduzir-se um fator β_L na determinação da força máxima. Existem várias propostas para este fator na literatura, como por exemplo em [8]. Para o caso da técnica EBR, este fator pode ser determinado, também, através da equação (5.18), assumindo-se agora um comprimento colado qualquer, $x=L_b$. Neste caso, a força máxima pode ser dada por:

$$F_{max} = \beta_L \cdot b_f \cdot \sqrt{2G_f \cdot E_f \cdot t_f} \quad (5.27)$$

onde:

$$\beta_L = \sqrt{\left(1 - \frac{2\sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2} + 2[1 - (1 - e^{-Bs_0})^2]}{e^{(D.L_b + C_2)\left(B\sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2}\right)} + 2 + 2\sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2}}\right)^2 - (1 - e^{-Bs_0})^2} \quad (5.28)$$

5.5. Curvas força-deslizamento

A curva força-deslizamento em $x=L_b$ pode ser obtida através do procedimento teórico descrito anteriormente. Esta curva pode ser obtida a partir da equação (5.18) assumindo que o compósito tem um comportamento linear e elástico, ou seja:

$$F(x = L_b) = \varepsilon(x = L_b) \cdot E_f \cdot t_f \cdot b_f = E_f \cdot t_f \cdot b_f \cdot D \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{2\sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2} + 2[1 - (1 - e^{-Bs_0})^2]}{e^{(D.L_b + C_2)\left(B\sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2}\right)} + 2 + 2\sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2}}\right)^2 - (1 - e^{-Bs_0})^2} \quad (5.29)$$

O deslizamento em $x = L_b$ é dado por:

$$s(x = L_b) = \frac{1}{B} \ln \left(\frac{e^{(D.L_b + C_2)\left(B\sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2}\right)} + 2 + 2\sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2}}{(2\sqrt{1 - (1 - e^{-Bs_0})^2} + 2[1 - (1 - e^{-Bs_0})^2])} \right) \quad (5.30)$$

Apresenta-se na Figura 5.2 a curva *bond-slip* e na Figura 5.3 as curvas força-deslizamento para dois comprimentos ligados diferentes pela técnica EBR. É de salientar que as curvas *bond-slip* e, por conseguinte, a relação força-deslizamento dependem das características dos materiais. Os parâmetros utilizados para definir a curva *bond-slip* foram obtidos a partir dos ensaios realizados no presente trabalho: $t_f = 1,4$ mm, $b_f = 10$ mm, $t_c = 300$ mm, $b_c = 300$ mm, $E_f = 159$ GPa e $E_c = 29$ GPa. Para a definição da curva *bond-slip* são precisos outros parâmetros obtidos experimentalmente: $s_{\max} = 0,06$ mm, $\tau_{\max} = 10,19$ MPa e $G_f = 1,874$ N/mm.

Para se perceber a influência do comprimento efetivo da ligação na curva força-deslizamento utilizaram-se dois comprimentos diferentes. Já foi referido no capítulo 2 de acordo com o Boletim 14 da FIB [29] que o comprimento efetivo da ligação, pode ser calculado por:

$$L_{eff} = \sqrt{\frac{E_f \cdot t_f}{c_2 \cdot f_{ctm}}} \quad (5.31)$$

onde c_2 é uma constante que no caso de um compósito CFRP toma o valor de 2,0. No caso do presente estudo o comprimento efetivo da ligação de acordo com esta expressão é de 242,0 mm e, por isso, escolheu-se apresentar as curvas carga-deslizamento para os comprimentos colados de 100 mm e 300 mm.

O comprimento efetivo da ligação pode ser encontrado fazendo um gráfico força máxima vs. comprimento colado, conforme se mostra na Figura 5.1. Nesta figura observa-se que o comprimento efetivo da ligação experimental é de cerca de 185 mm, uma vez que é a partir destes valores que a força fica constante. Assim, verifica-se que o comprimento efetivo da ligação proposto pelo Boletim 14 da FIB [29] sobrestima o valor do comprimento efetivo da ligação.

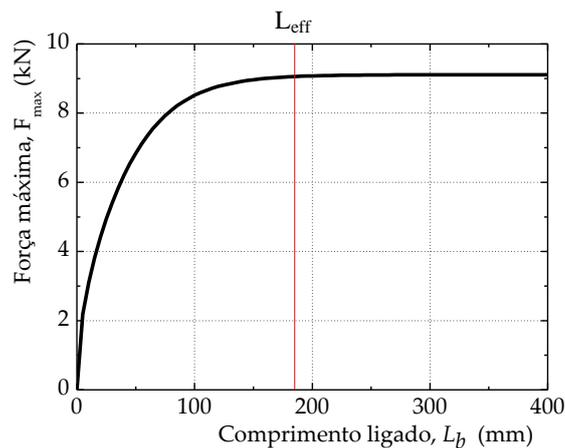


Figura 5.1 – Gráfico força máxima vs. comprimento colado.

A curva *bond-slip* da ligação foi obtida de acordo com o procedimento analítico descrito anteriormente. O processo de descolamento foi controlado pelo aumento do deslizamento em $x=0$, extremidade livre, tendo-se, para cargas baixas recorrido a deslizamentos em $x=0$ muito pequenos.

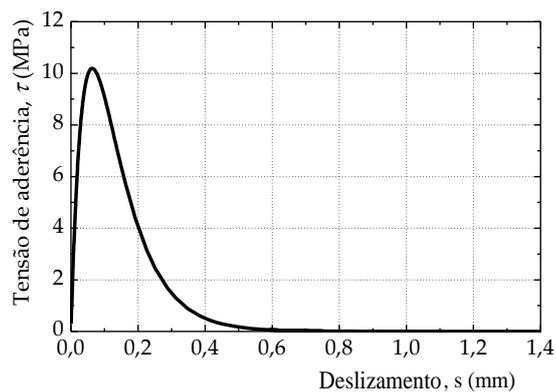


Figura 5.2 - Carga *bond-slip* para os parâmetros referidos.

A Figura 5.3 apresenta as curvas carga-deslizamento para dois comprimentos de 300 mm e 100 mm.

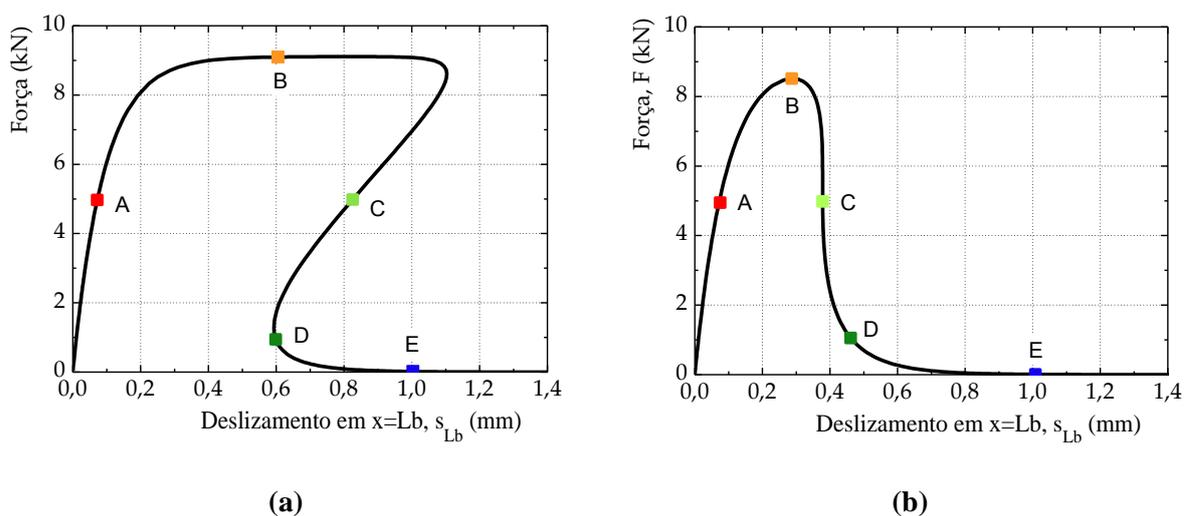


Figura 5.3 - Curvas força vs. deslizamento para a interface CFRP-Betão com um comprimento colado de: (a) 300 mm; e (b) 100 mm.

Através da análise da Figura 5.3 é possível ver que a resposta força-deslizamento é bastante diferente para os dois comprimentos colados. Até a força máxima ser atingida, a resposta para os dois comprimentos é similar. Depois disso, a força máxima é alcançada com valor dependente do comprimento colado, verificando-se que para o comprimento de 100 mm a força máxima obtida é ligeiramente inferior à obtida para o comprimento de 300 mm. No caso do comprimento de 100 mm, a interface tem um comportamento mais frágil, enquanto no caso do comprimento longo é visível um patamar em que a carga se mantém constante. Este patamar é tanto maior quanto maior for o comprimento colado. Depois disso, para o caso em que o comprimento colado é longo, $x=300$ mm, o aumento do deslizamento na extremidade livre, $x=0$, provoca uma diminuição na

força transmitida ao compósito de FRP e no deslizamento na extremidade carregada, $x=L_b$, até ser atingido o ponto D. Depois de atingido o ponto D, para o comprimento colado longo, o deslizamento em $x=L_b$ volta a aumentar, enquanto a força continua a diminuir, é a este fenómeno que se dá o nome de snap-back.

Para o comprimento colado de 100 mm, depois de atingida a força máxima, verifica-se que o aumento de deslizamento na extremidade livre, $x=0$, provoca um aumento de deslizamento na extremidade carregada, $x=L_b$, acompanhado de uma diminuição da força.

5.6. Forças transmitidas ao betão

A partir da formulação teórica descrita anteriormente é possível também determinar as forças transmitidas ao substrato de betão. Partindo da equação de equilíbrio relativamente ao substrato e já deduzida no subcapítulo 2.7:

$$\frac{d\sigma_c(x)}{dx} + \frac{\tau(x) \cdot b_f}{t_c \cdot b_c} = 0 \quad (5.32)$$

que integrando em ordem a x e sabendo que:

$$\sigma_c(x) = \frac{F_c}{t_c \cdot b_c} \quad (5.33)$$

a força no substrato é dada por:

$$F_c(x) = -b_f \int \tau(x) dx \quad (5.34)$$

Substituindo a equação (2.37) na equação anterior tem-se:

$$F_c(x) = -b_f \cdot D^2 \cdot B \cdot E_f \cdot t_f \int (e^{-B \cdot s(x)} - e^{-2 \cdot B \cdot s(x)}) dx \quad (5.35)$$

Substituindo equação (5.15), na equação (5.35), a força no betão é:

$$\begin{aligned}
F_c(x) = -b_f \cdot D^2 \cdot B \cdot E_f \cdot t_f \cdot \left[k_1 \cdot \left(\frac{x}{k_3} - \frac{\ln(e^{-C_2 \cdot k_2} \cdot (e^{D \cdot x \cdot k_2 + C_2 \cdot k_2} + k_3))}{D \cdot k_3 \cdot k_2} \right) \right. \\
\left. - k_1^2 \cdot \left(-\frac{\ln(e^{D \cdot x \cdot k_2 + C_2 \cdot k_2} + k_3)}{D \cdot k_3^2 \cdot k_2} \right) \right. \\
\left. + \frac{1}{D \cdot k_2 \cdot (k_3 \cdot e^{D \cdot x \cdot k_2 + C_2 \cdot k_2} + k_3^2)} + \frac{D \cdot x \cdot k_2 + C_2 \cdot k_2}{D \cdot k_3^2 \cdot k_2} \right) + C_3 \quad (5.36)
\end{aligned}$$

onde D é a extensão máxima definida pela equação (5.10); e k_1 , k_2 e k_3 são constantes admitidas por simplificação, dadas por:

$$k_1 = 2\sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2} + 2 \cdot [1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2] \quad (5.37)$$

$$k_2 = B \cdot \sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2} \quad (5.38)$$

$$k_3 = 2 + 2\sqrt{1 - (1 - e^{-B \cdot s_0})^2} \quad (5.39)$$

De acordo com alguns estudos, como por exemplo, Ferracuti [28], na extremidade carregada de compósito de CFRP as forças no substrato são sempre nulas, enquanto na extremidade livre, em $x=0$, as forças no substrato de betão são máximas e aumentam com o aumento da força transmitida ao laminado de CFRP. No entanto, quando se inicia o descolamento, as forças no betão junto da extremidade livre começam a diminuir, tendendo para zero.

Admitindo que as forças no betão na extremidade carregada, em $x=L_b$, são nulas, a constante C_3 é:

$$\begin{aligned}
C_3 = - \left[k_1 \cdot \left(\frac{L_b}{k_3} - \frac{\ln(e^{-C_2 \cdot k_2} \cdot (e^{D \cdot L_b \cdot k_2 + C_2 \cdot k_2} + k_3))}{D \cdot k_3 \cdot k_2} \right) \right. \\
\left. - k_1^2 \cdot \left(-\frac{\ln(e^{D \cdot L_b \cdot k_2 + C_2 \cdot k_2} + k_3)}{D \cdot k_3^2 \cdot k_2} \right) \right. \\
\left. + \frac{1}{D \cdot k_2 \cdot (k_3 \cdot e^{D \cdot L_b \cdot k_2 + C_2 \cdot k_2} + k_3^2)} + \frac{D \cdot L_b \cdot k_2 + C_2 \cdot k_2}{D \cdot k_3^2 \cdot k_2} \right) \quad (5.40)
\end{aligned}$$

Note-se que, tal como explicado no subcapítulo 4.1, se deve considerar que a técnica NSM é equivalente a duas técnicas EBR para metade da espessura e, por isso, a equação da força transmitida ao betão fica dada por:

$$F_c(x) = -b_f \cdot D^2 \cdot B \cdot E_f \cdot \frac{t_f}{2} \cdot \left[k_1 \cdot \left(\frac{x}{k_3} - \frac{\ln(e^{-C_2 \cdot k_2} \cdot (e^{D \cdot x \cdot k_2 + C_2 \cdot k_2} + k_3))}{D \cdot k_3 \cdot k_2} \right) - k_1^2 \cdot \left(-\frac{\ln(e^{D \cdot x \cdot k_2 + C_2 \cdot k_2} + k_3)}{D \cdot k_3^2 \cdot k_2} + \frac{1}{D \cdot k_2 \cdot (k_3 \cdot e^{D \cdot x \cdot k_2 + C_2 \cdot k_2} + k_3^2)} + \frac{D \cdot x \cdot k_2 + C_2 \cdot k_2}{D \cdot k_3^2 \cdot k_2} \right) + C_3 \right] \quad (5.41)$$

5.7. Validação do modelo analítico

A validação do modelo analítico proposto foi feita através da comparação entre os resultados obtidos analiticamente e os resultados obtidos quer experimentalmente quer teoricamente, sendo os resultados experimentais os obtidos durante este estudo e os resultados teóricos obtidos a partir de análises encontradas na literatura, Biscaia et al. [11] e Ueda e Dai [20].

5.7.1. Técnica EBR

No modelo analítico, assumiram-se as características dos materiais utilizados nos ensaios experimentais do presente trabalho: $t_p = 1,4$ mm, $b_p = 10$ mm, $t_s = 300$ mm, $b_s = 300$ mm, $E_p = 159$ GPa e $E_s = 29$ GPa. Para se conseguir utilizar o modelo analítico proposto foi necessário definir uma curva *bond-slip*, a qual ficou definida a partir de ensaios experimentais com comprimento colado de 300 mm, desta forma garantiu-se que o comprimento colado seria superior ao efetivo. Como os ensaios EBR_300_02 e EBR_300_04 foram os que apresentaram resultados experimentais mais próximos, foram obtidos parâmetros experimentais apenas para estes dois ensaios.

Para o ensaio EBR_300_02 obtiveram-se os seguintes parâmetros: $s_{\max} = 0,061$ mm, $\tau_{\max} = 9,39$ MPa e $G_f = 1,645$ N/mm. Por outro lado, para o ensaio EBR_300_04 foram obtidos os seguintes parâmetros: $s_{\max} = 0,066$ mm, $\tau_{\max} = 10,99$ MPa e $G_f = 2,103$ N/mm. A Figura 5.4 apresenta as curvas *bond-slip* experimentais e analíticas obtidas para estes dois ensaios. A partir destas duas curvas *bond-slip* analíticas foi encontrada uma curva analítica média (veja-se a Figura 5.4). Os parâmetros da curva *bond-slip* média são: $s_{\max} = 0,064$ mm, $\tau_{\max} = 10,19$ MPa e $G_f = 1,874$ N/mm.

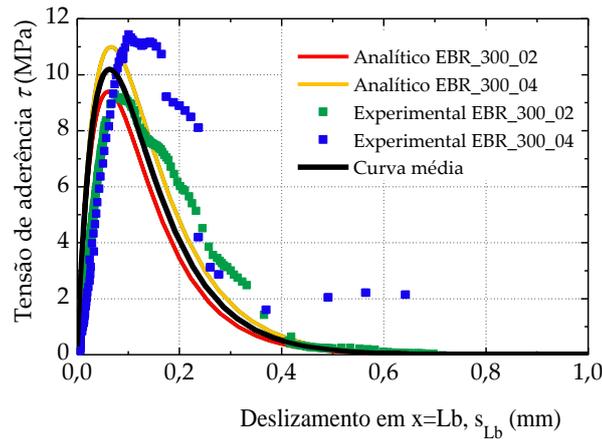


Figura 5.4 - Curvas *bond-slip* experimentais e analíticas para um comprimento colado de 300 mm.

Assim, a curva *bond-slip* média foi assumida na modelação analítica do desempenho da ligação CFRP/betão. Em seguida apresentam-se as comparações entre os resultados obtidos a partir desta modelação e os resultados obtidos experimentalmente para os vários comprimentos colados considerados.

5.7.1.1. Amostras com comprimento colado de 300 mm

Como já foi referido anteriormente, para o comprimento colado de 300 mm apenas foram comparados com o modelo analítico os resultados experimentais obtidos para os ensaios EBR_300_02 e EBR_300_04. Assim, analisando os gráficos apresentados na Figura 5.5, verifica-se que o modelo analítico conseguiu estimar bastante bem os resultados dos dois ensaios experimentais, a nível de força-deslizamento, extensão-deslizamento e tensão de aderência-deslizamento. Repara-se que experimentalmente só se conseguem obter dados até ser atingida a força máxima, já que os modos de rotura ocorrem de forma brusca e o ensaio é controlado por incrementos de força.

Repara-se, através da Figura 5.5(a), que a força máxima analítica, $F_{\max}=9,11$ kN, é um pouco mais elevada que as obtidas pelos dois ensaios. No entanto, o erro entre a força máxima analítica e as experimentais é pequeno, sendo de aproximadamente 3,3% para o ensaio EBR_300_02 e de 5,4% para o ensaio EBR_300_04.

O valor máxima da extensão estimado pelo modelo analítico, $\varepsilon_{\max}=0,41\%$, é próximo dos obtidos para os ensaios experimentais, observando-se um erro de 7,3% para o ensaio EBR_300_02 e de 4,9% para o ensaio EBR_300_04.

A tensão de aderência máxima estimada pelo modelo analítico é de 10,19 MPa. Observa-se um erro de 8,6% entre o modelo analítico e o ensaio EBR_300_02 e um erro de 12,3% para o ensaio EBR_300_04.

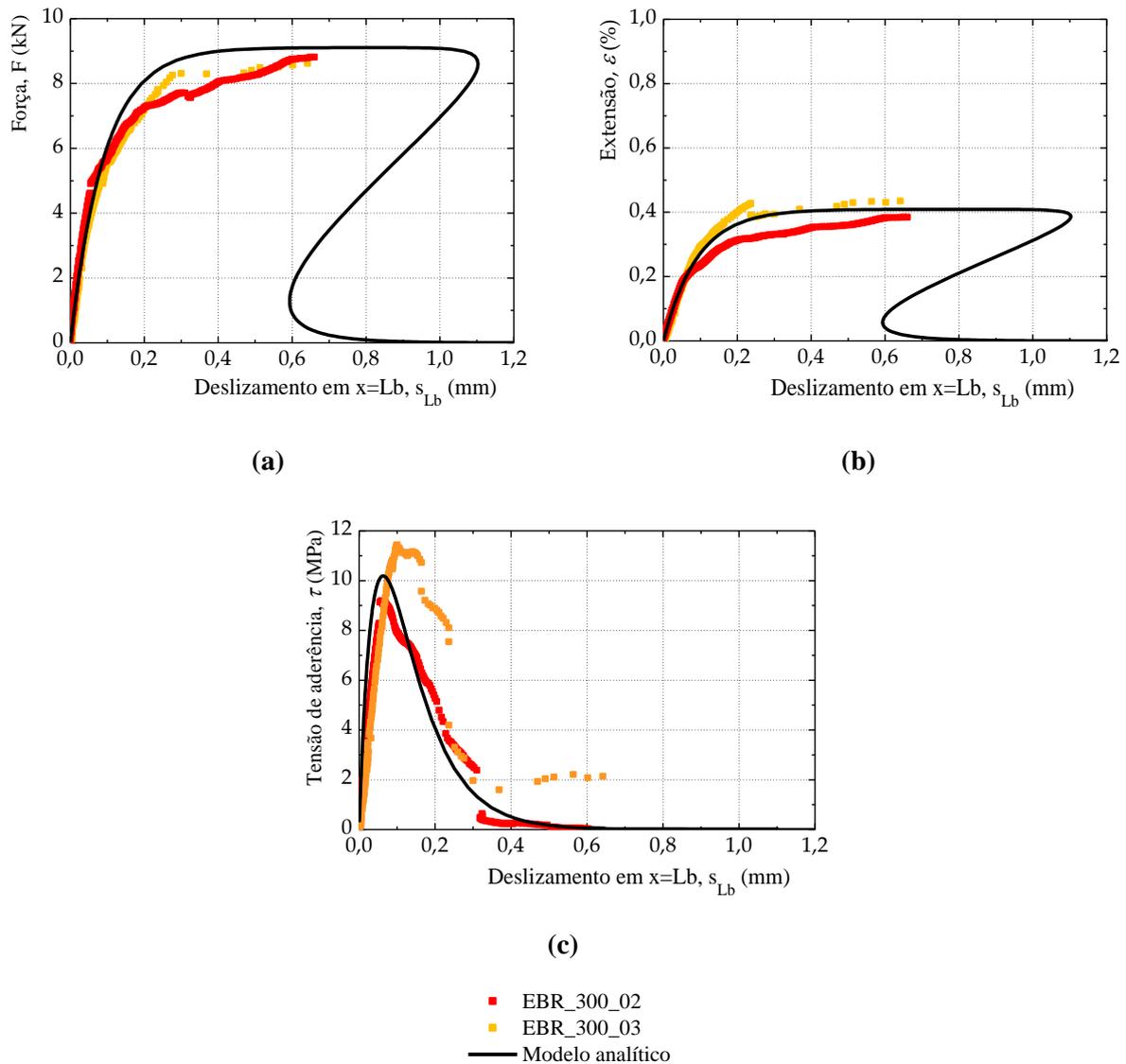


Figura 5.5 – Curvas analíticas e experimentais: (a) força-deslizamento; (b) extensão-deslizamento; e (c) tensão de aderência-deslizamento.

A Figura 5.6 mostra as curvas força vs. deslizamento e tensão de aderência vs. deslizamento de CFRP em $x=L_b$, onde se identificam quatro pontos: A, B, C e D. Estes pontos referem-se a:

- (i) Ponto A: fase em que a ligação está em regime elástico, isto é, antes de atingir a tensão de aderência máxima, τ_{max} ;
- (ii) Ponto B: fase em que a ligação atinge τ_{max} em $x=L_b$;
- (iii) Ponto C: fase em que parte da ligação perde aderência com a deformação (softening);

- (iv) Ponto D: fase em que se atinge a força máxima analítica transmitida ao compósito de FRP.

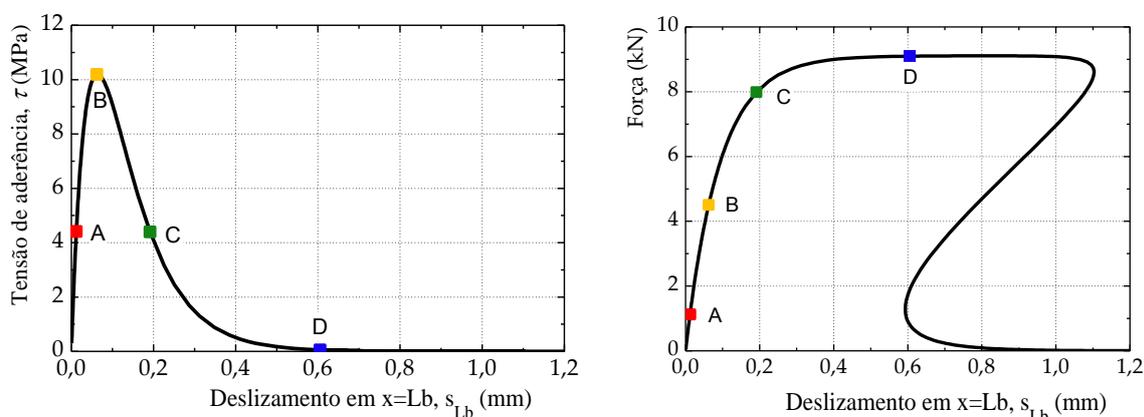


Figura 5.6 – Curvas analítica tensão de aderência vs. deslizamento e força vs. deslizamento para um comprimento colado de 300 mm.

A Figura 5.7 mostra os deslizamentos e as extensões no compósito de CFRP e as tensões de aderência na interface ao longo do comprimento colado para os pontos de A a D. Ao observar a Figura 5.7 percebe-se que as curvas analíticas dos pontos A, B e C se aproximam bastante dos valores experimentais. No ponto D existe uma maior discrepância entre o modelo analítico e os resultados experimentais.

A partir da Figura 5.7(a) verifica-se que, tal como esperado, junta da extremidade livre, em $x=0$, todos os pontos tem deslizamento nulo, confirmando-se, assim, que o comprimento colado de 300 mm é superior ao comprimento efetivo da ligação. Junto da extremidade carregada, em $x=L_b$, os deslizamentos vão aumentando, sendo os pontos A e D os pontos com menores e maiores valores de deslizamento, respetivamente. Para a Figura 5.7(b) também se observa que junto da extremidade livre as extensões são nulas e junto da extremidade carregada os valores de extensão vão aumentando. Observa-se ainda que no Ponto D, junto da extremidade carregada, existe um patamar constante de extensões.

Estudou-se também o que acontece no substrato de betão, determinando-se a força transmitida ao betão. A força analítica no betão foi determinada com base na expressão (5.36), apresentada no subcapítulo 5.6. O gráfico da Figura 5.8 apresenta as curvas analíticas e os pontos experimentais da força no betão vs. comprimento colado para os pontos identificados na Figura 5.6. A Figura 5.8 mostra que junto da extremidade carregada, em $x=L_b$, as forças no betão são praticamente nulas, enquanto junto da extremidade livre, em $x=0$, as forças no betão tomam valores máximos, que aumentam com o aumento da força transmitida ao laminado de CFRP. Através da Figura 5.8, verifica-se que os dados experimentais não diferem muito das curvas analíticas obtidas. Note-se que, neste caso, a força máxima transmitida ao betão junto da extremidade livre atinge o valor da

força máxima transmitida ao compósito de CFRP na extremidade carregada. Isto acontece porque o comprimento colado é superior ao comprimento efetivo e, por isso, a extensão é nula junto da extremidade livre.

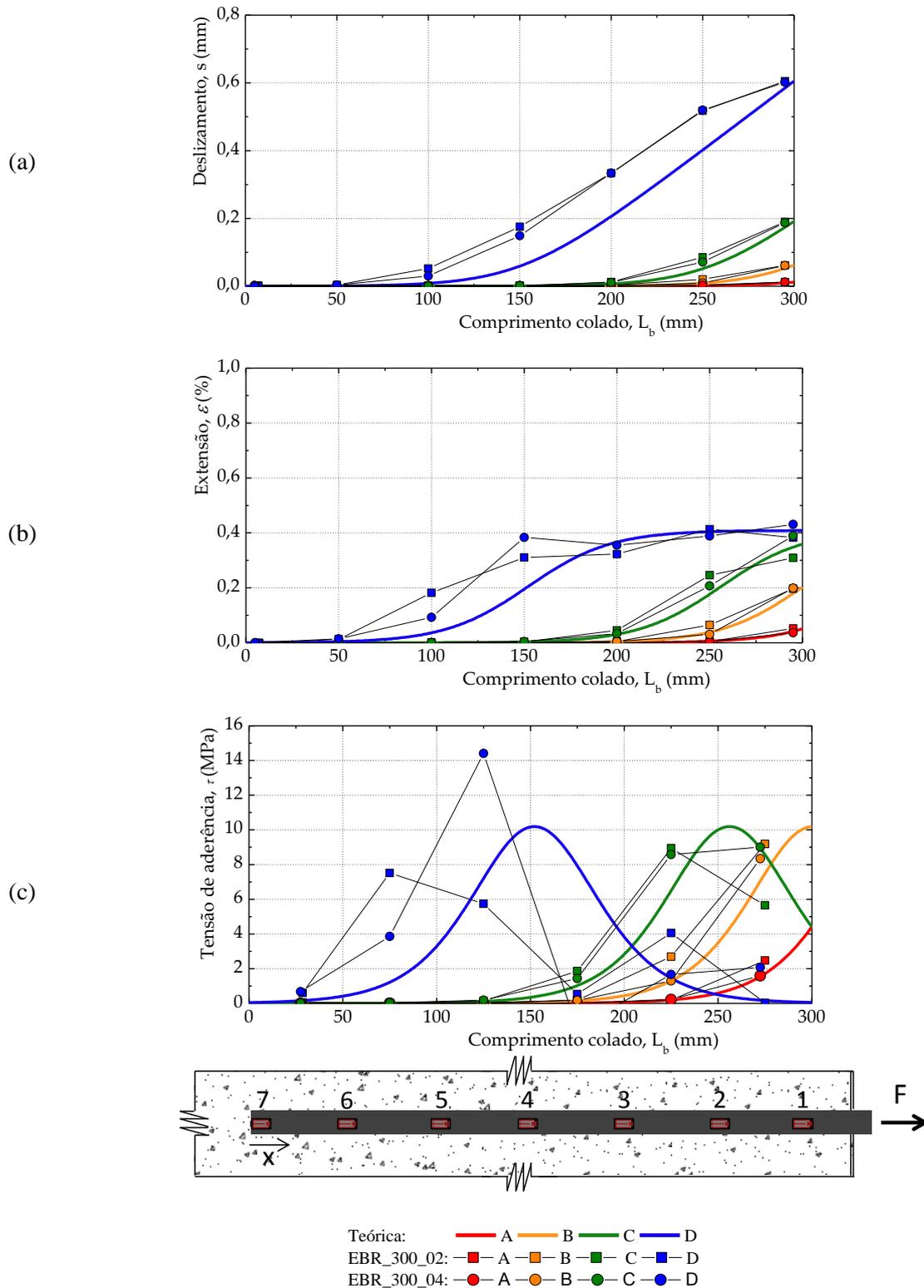


Figura 5.7 – Distribuição de deslizamento e extensões no FRP e tensões de aderência na interface ao longo do comprimento colado de 300 mm.

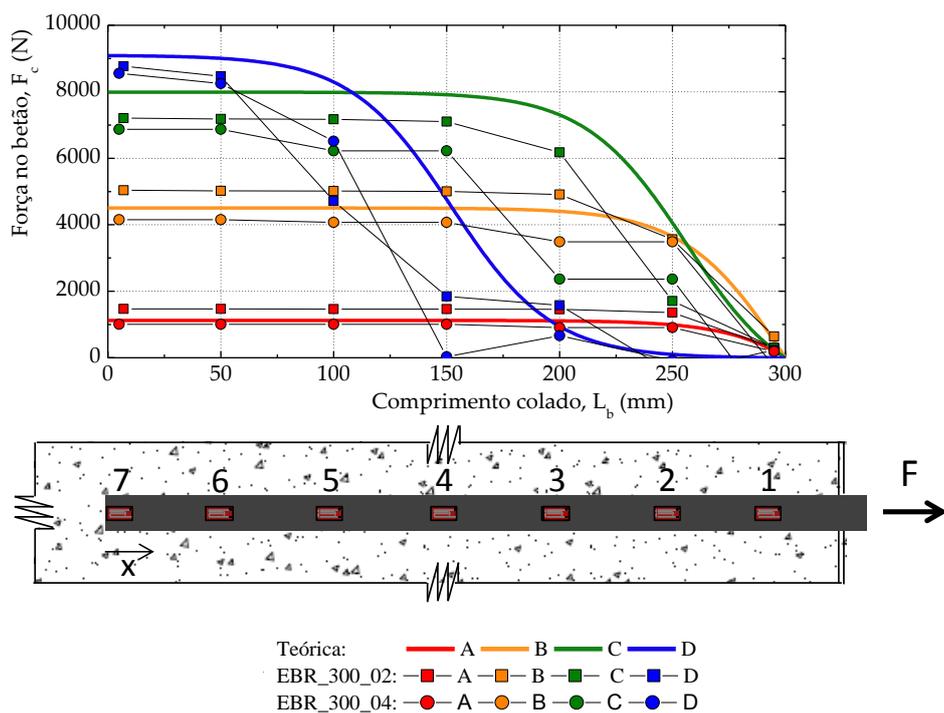


Figura 5.8 – Distribuição da força no betão ao longo do comprimento colado de 300 mm.

5.7.1.2. Amostras com comprimento colado de 150 mm

Através da análise dos gráficos apresentados na Figura 5.9, verifica-se que a nível de força-deslizamento e extensão-deslizamento o modelo analítico aproxima-se razoavelmente bem aos dados obtidos experimentalmente. A carga máxima obtida experimentalmente é ligeiramente inferior à estimada pelo modelo analítico, $F_{max}=8,97$ kN, observando-se um erro de aproximadamente 7,2%. Repara-se que a força máxima experimental ocorre para um valor de deslizamento bastante inferior ao do modelo analítico, $s_{ult}=0,418$ mm, sendo o erro entre estes dois deslizamentos de cerca de 65,8%.

O valor de extensão máxima previsto pelo modelo analítico é de 0,40% e verifica-se que este valor é muito próximo do obtido experimentalmente, sendo o erro de apenas 2,5%.

Na Figura 5.9(c) observa-se que o modelo analítico apresenta um valor máximo de tensão de aderência, $\tau_{max}=10,19$ MPa, bastante mais baixo do que o obtido experimentalmente, observando-se um erro de 83,6%. No entanto, o deslizamento analítico para o qual se atinge a tensão de aderência máxima, $s_{max}=0,064$ mm, não está tão longe do valor previsto experimentalmente, sendo o erro de 27,0%.

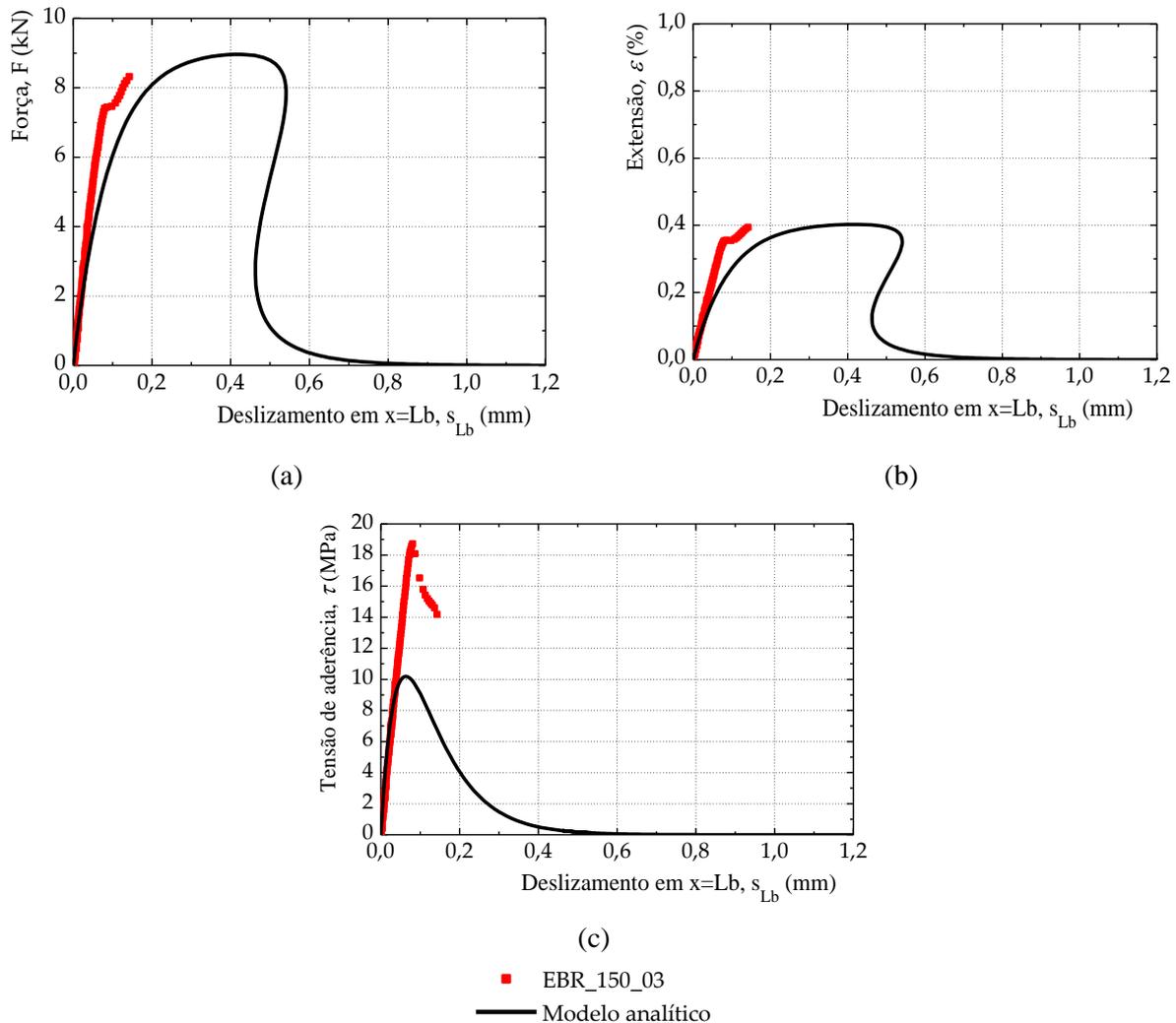


Figura 5.9 - Curvas analíticas e experimentais de força-deslizamento, extensão-deslizamento e tensão de aderência-deslizamento.

Tal como no caso do comprimento colado de 300 mm, os pontos identificados nas curvas *bond-slip* e força-deslizamento da Figura 5.10 são representados na Figura 5.11, através de deslizamentos e extensões no compósito de CFRP e tensões de aderência na interface ao longo do comprimento colado. Estes pontos referem-se a:

- (i) Ponto A: fase em que a ligação está em regime elástico, isto é, antes de atingir a tensão de aderência máxima, τ_{max} ;
- (ii) Ponto B: fase em que a ligação atinge τ_{max} em $x=L_b$;
- (iii) Ponto C: fase em que parte da ligação perde aderência com a deformação (softening) e onde é atingida a força máxima experimental;
- (iv) Ponto D: fase em que se atinge a força máxima analítica transmitida ao compósito de FRP.

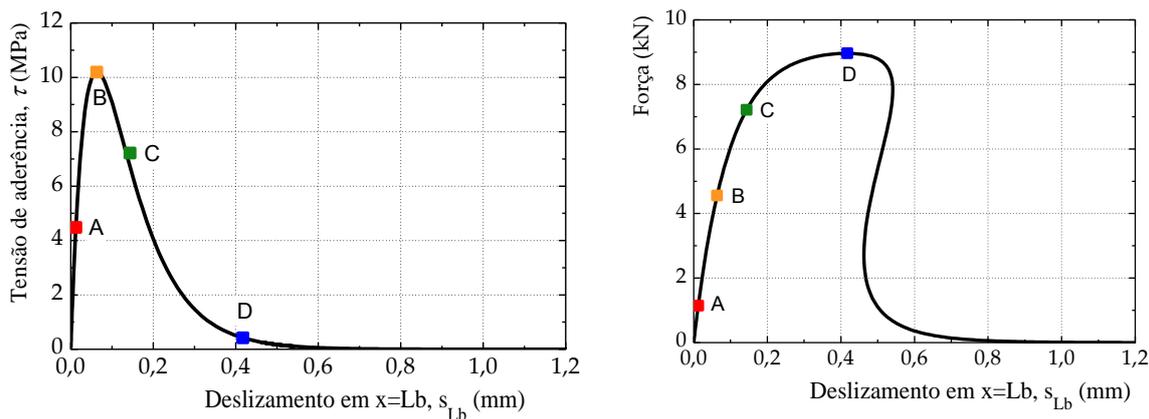


Figura 5.10 - Curvas analíticas tensão de aderência vs. deslizamento e força vs. deslizamento para um comprimento colado de 150 mm.

Através da Figura 5.11, repara-se que para o ponto D não existem dados experimentais, uma vez que a força máxima experimental é atingida para o ponto C. Para o comprimento colado de 150 mm também se verifica que junto da extremidade livre, em $x=0$, para os pontos A, B e C, os deslizamento e as extensões são nulos. Tal como no caso anterior, junto da extremidade carregada, em $x=L_b$, os deslizamentos vão aumentando, sendo os pontos A e D os pontos com menores e maiores valores de deslizamento, respetivamente. Ao observar a Figura 5.11(a) constata-se que as curvas analíticas de deslizamento dos pontos A, B e C se aproximam bastante bem dos valores experimentais.

A Figura 5.11(b) mostra que, no ponto D, junto da extremidade carregada, não se observa um patamar contante, como se observava para o comprimento colado de 300 mm. Para o mesmo gráfico, verifica-se que no ponto A as extensões experimentais estão bastante próximas das previstas pelo modelo analítico, no entanto, nos pontos B e C verifica-se uma diferença significativa, as extensões experimentais junto da extremidade carregada são superiores às estimadas pelo modelo analítico.

Em termos de tensões de aderência na ligação, observa-se que existe uma diferença significativa entre as curvas analíticas e os resultados experimentais nos três pontos, A, B e C. No entanto, considera-se que esta diferença se pode dever ao fato de se considerar que a tensão de aderência experimental entre extensómetros é constante.

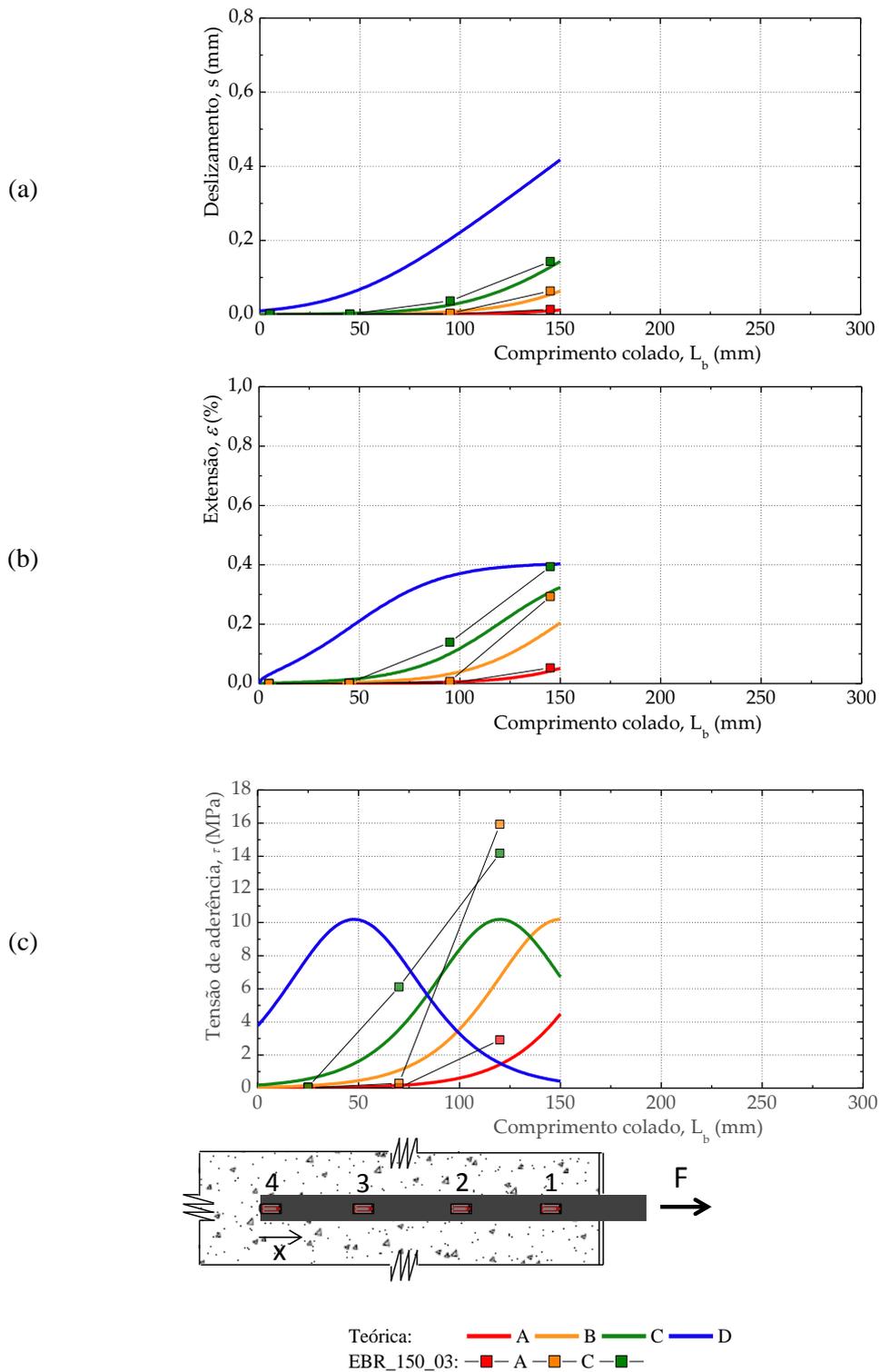


Figura 5.11 - Distribuição de deslizamento e extensões no FRP e tensões de aderência na interface ao longo do comprimento colado de 150 mm.

Para o comprimento de 150 mm também se determinaram as forças exercidas no substrato de betão. O gráfico da Figura 5.12 apresenta as curvas analíticas e os pontos experimentais da força no betão vs. comprimento colado para os pontos identificados na Figura 5.10. Para o comprimento

colado de 150 mm, também se verifica que na extremidade carregada os valores da força exercida no betão são nulos. A partir da Figura 5.12, verifica-se também que para o ponto A os dados experimentais estão muito próximos da previsão da curva analítica. No entanto, os dados experimentais dos pontos B e C diferem bastante das curvas analíticas, principalmente junto da extremidade livre.

Neste caso, para o ponto C, observa-se que, tal como para o comprimento de 300 mm, a força máxima experimental transmitida ao betão na extremidade livre é igual à força máxima experimental transmitida ao compósito de CFRP na extremidade carregada. No entanto, para o ponto D, verifica-se que a força máxima analítica transmitida ao betão na extremidade livre é um pouco inferior à força máxima analítica transmitida ao compósito de CFRP na extremidade carregada. Isto acontece porque, para o ponto D, na vizinhança da extremidade livre, os valores de extensão analíticos são superiores a zero.

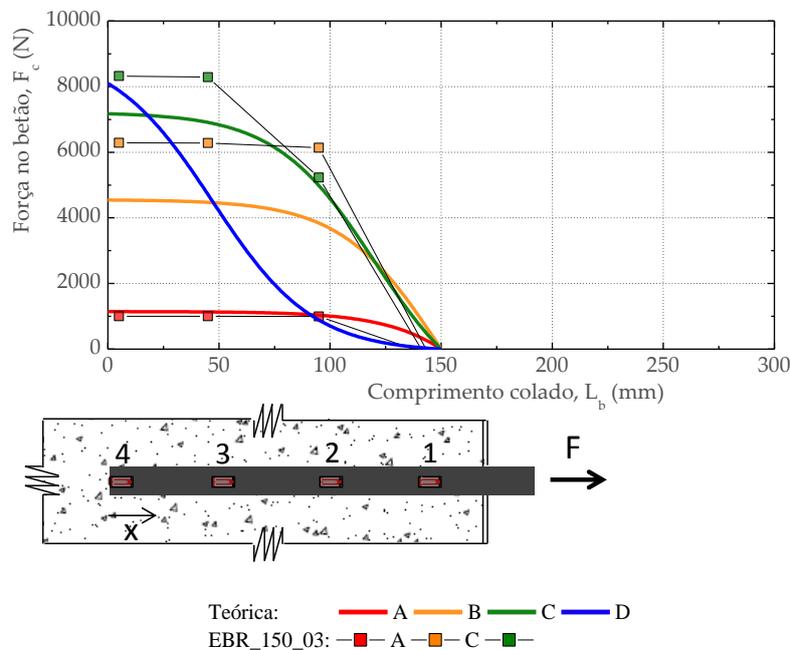


Figura 5.12 - Distribuição da força no betão ao longo do comprimento colado de 150 mm.

5.7.1.3. Amostras com comprimento colado de 100 mm

A Figura 5.13 apresenta os gráficos força-deslizamento, extensão-deslizamento e tensão de aderência-deslizamento para a sobreposição dos resultados experimentais dos ensaios EBR_100_01 e EBR_100_02 com as previsões do modelo analítico. Já se referiu anteriormente que estes dois ensaios experimentais têm resultados e andamentos muito próximos. Verifica-se que o andamento do modelo analítico para os três gráficos é muito semelhante aos dos resultados

experimentais, no entanto, verifica-se que o modelo analítico prevê valores superiores de forças, extensões e tensões de aderência.

A partir da Figura 5.13(a) verifica-se que a curva analítica prevê valores de força máxima superiores aos obtidos experimentalmente, observando-se um erro de 25,4% entre a curva analítica e o ensaio EBR_100_01 e um erro de 19,2% para o ensaio EBR_100_02. Verifica-se ainda que o deslizamento último analítico, $s_{ult}=0,287$ mm, é superior aos experimentais, observando-se um erro de 46,3% para o ensaio EBR_100_01 e de 37,6% para o ensaio EBR_100_02.

Através da Figura 5.13(b), observa-se que a extensão máxima analítica de 0,38% é bastante superior às experimentais, existindo um erro de 23,7% entre a extensão máxima do modelo analítico e a do ensaio EBR_100_01 e um erro de 18,4% para o ensaio EBR_100_02.

Relativamente às tensões de aderência, verifica-se que o valor máximo previsto pelo modelo analítico, 10,19 MPa, é também superior aos valores obtidos através dos ensaios experimentais, observando-se um erro entre o modelo analítico e o ensaio EBR_100_01 de 18,1% e de 15,0% para o ensaio EBR_100_02.

Tal como nos casos mostrados anteriormente, a Figura 5.14 mostra as curvas *bond-slip* e força-deslizamento na extremidade carregada, $x=L_b$, onde se identificam quatro pontos: A, B, C e D, que se referem a:

- (i) Ponto A: fase em que a ligação está em regime elástico, isto é, antes de atingir a tensão de aderência máxima, τ_{max} ;
- (ii) Ponto B: fase em que a ligação atinge τ_{max} em $x=L_b$;
- (iii) Ponto C: fase em que parte da ligação perde aderência com a deformação (softening) e onde é atingida a força máxima para o ensaio EBR_100_01;
- (iv) Ponto D: fase em que se atinge a força máxima analítica transmitida ao compósito de FRP.

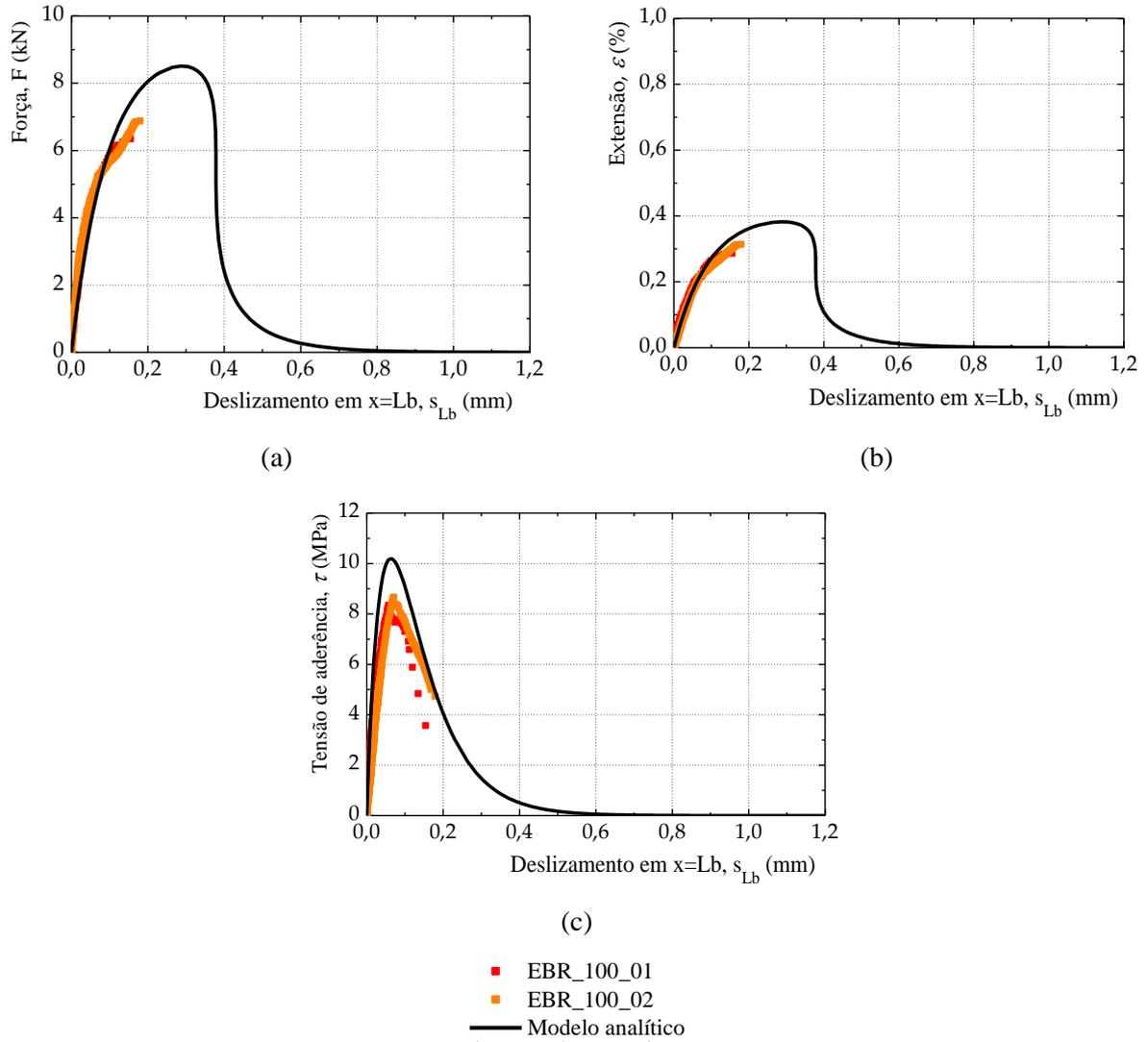


Figura 5.13 - Curvas analíticas e experimentais de força-deslizamento, extensão-deslizamento e tensão de aderência-deslizamento.

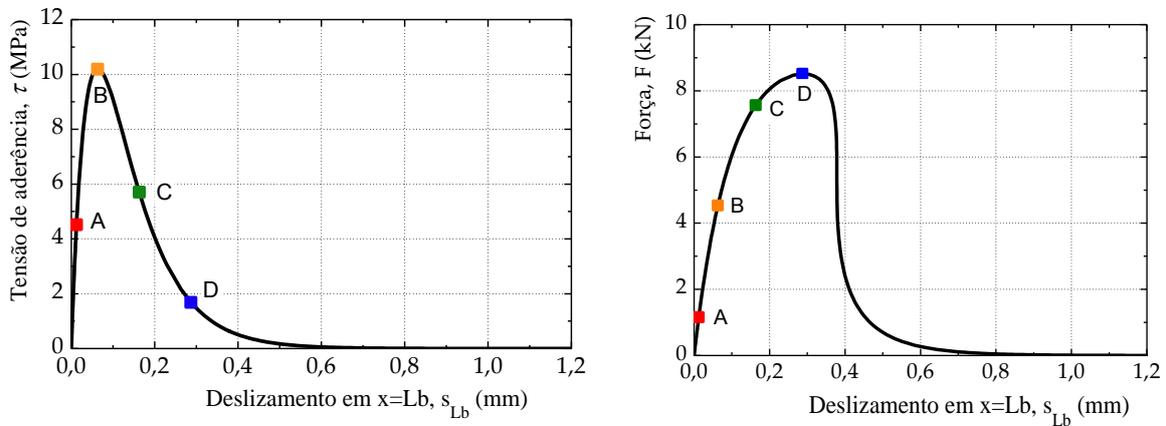


Figura 5.14 - Curvas analíticas tensão de aderência vs. deslizamento e força vs. deslizamento para um comprimento colado de 100 mm.

Tal como nos casos mostrados anteriormente, os pontos identificados nas curvas *bond-slip* e força-deslizamento na extremidade carregada, $x=L_b$, da Figura 5.14 são representados na Figura 5.15, através de deslizamentos e extensões no compósito de CFRP e tensões de aderência na interface ao longo do comprimento colado.

Ao observar a Figura 5.15 constata-se que as curvas analíticas para os três gráficos nos pontos A, B e C se aproximam bastante bem dos valores experimentais. Verifica-se que na vizinhança da extremidade livre, em $x=0$, os deslizamentos são praticamente nulos e as extensões tomam valores diferentes de zero. Neste caso, junto da extremidade carregada, em $x=L_b$, os deslizamentos também vão aumentando, sendo os pontos A e D os pontos com menores e maiores valores de deslizamento, respetivamente.

A Figura 5.15(b) mostra também que, no ponto D, junto da extremidade carregada, não se observa um patamar contante. Para o mesmo gráfico, verifica-se que o ponto C é o ponto que apresenta uma maior discrepância entre o modelo analítico e os dados experimentais junto da extremidade carregada.

Em termos de tensões de aderência na ligação, observa-se que nos pontos A e B o modelo analítico aproxima-se bastante bem dos resultados experimentais. A maior diferença é observada para o ponto C para o valor máximo.

O gráfico da Figura 5.16 apresenta as curvas analíticas e os dados experimentais da força no betão vs. comprimento colado para os pontos identificados na Figura 5.14. Para este caso, também se verificou que na extremidade carregada os valores da força exercida no betão são praticamente nulos. Na extremidade livre observa-se que nos pontos A, B e C os valores da força exercida no betão vão aumentando. No entanto, no ponto D, a força transmitida ao substrato baixou um pouco, o que significa que já se iniciou o descolamento. Verifica-se que para os pontos A, B e C as curvas analíticas se aproximam bastante dos dados experimentais. Como o comprimento colado de 100 mm é inferior ao comprimento efetivo da ligação, observa-se que as forças transmitidas ao betão na extremidade livre são mais baixas que as transmitidas ao compósito de CFRP na extremidade carregada.

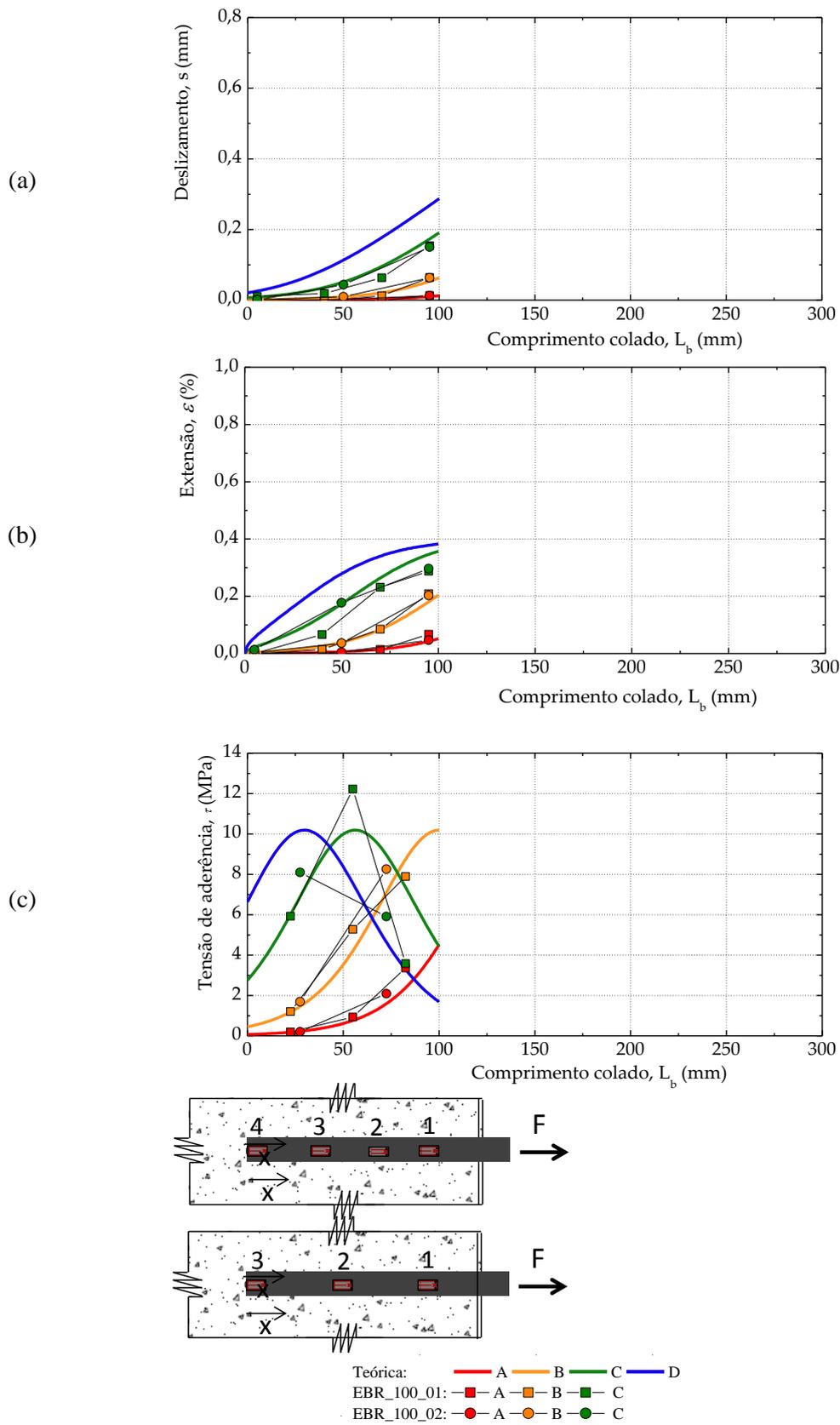


Figura 5.15 - Distribuição de deslizamento e extensões no FRP e tensões de aderência na interface ao longo do comprimento colado de 100 mm.

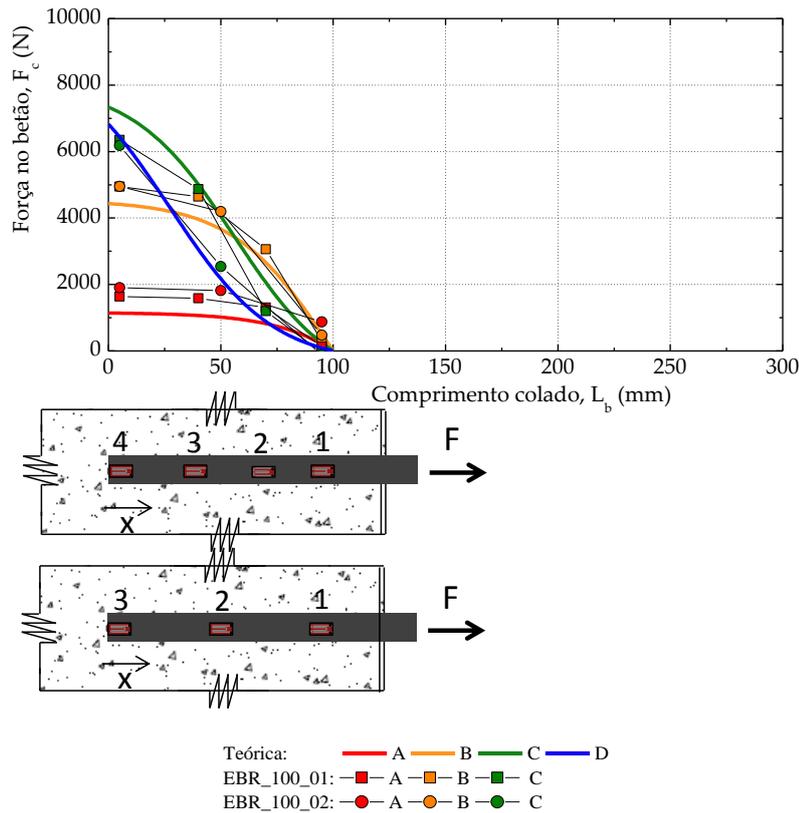


Figura 5.16 - Distribuição da força no betão ao longo do comprimento colado de 100 mm.

5.7.1.4. Amostras com comprimento colado de 50 mm

A Figura 5.17 apresenta os gráficos força-deslizamento, extensão-deslizamento e tensão de aderência-deslizamento com os resultados experimentais para os ensaios EBR_050_01 e EBR_050_02 e as previsões do modelo analítico. Através da Figura 5.17(a) e (b), verifica-se que o ensaio EBR_050_01 apresenta um andamento parecido com o do modelo analítico e o ensaio EBR_050_02 apresenta um andamento idêntico ao analítico até uma carga de cerca de 4 kN, a partir desse momento o andamento torna-se bastante diferente.

O modelo analítico prevê uma força máxima de 6,84 kN, que é superior às obtidas pelos dois ensaios, observando-se um erro entre a força máxima analítica e a do ensaio EBR_050_01 de 25,9% e de 14,2% para o ensaio EBR_050_02. O deslizamento último estimado analiticamente, 0,172 mm, também é superior ao obtido pelo ensaio EBR_050_01, sendo o erro de 73,2%. No entanto, o deslizamento último analítico é inferior ao do ensaio EBR_050_02 com um erro de 55,2%.

A extensão máxima prevista pelo modelo analítico, 0,31%, é superior às obtidos nos dois ensaios, existindo um erro de 67,7% para o ensaio EBR_050_01 e um de 22,6% para o ensaio EBR_050_02.

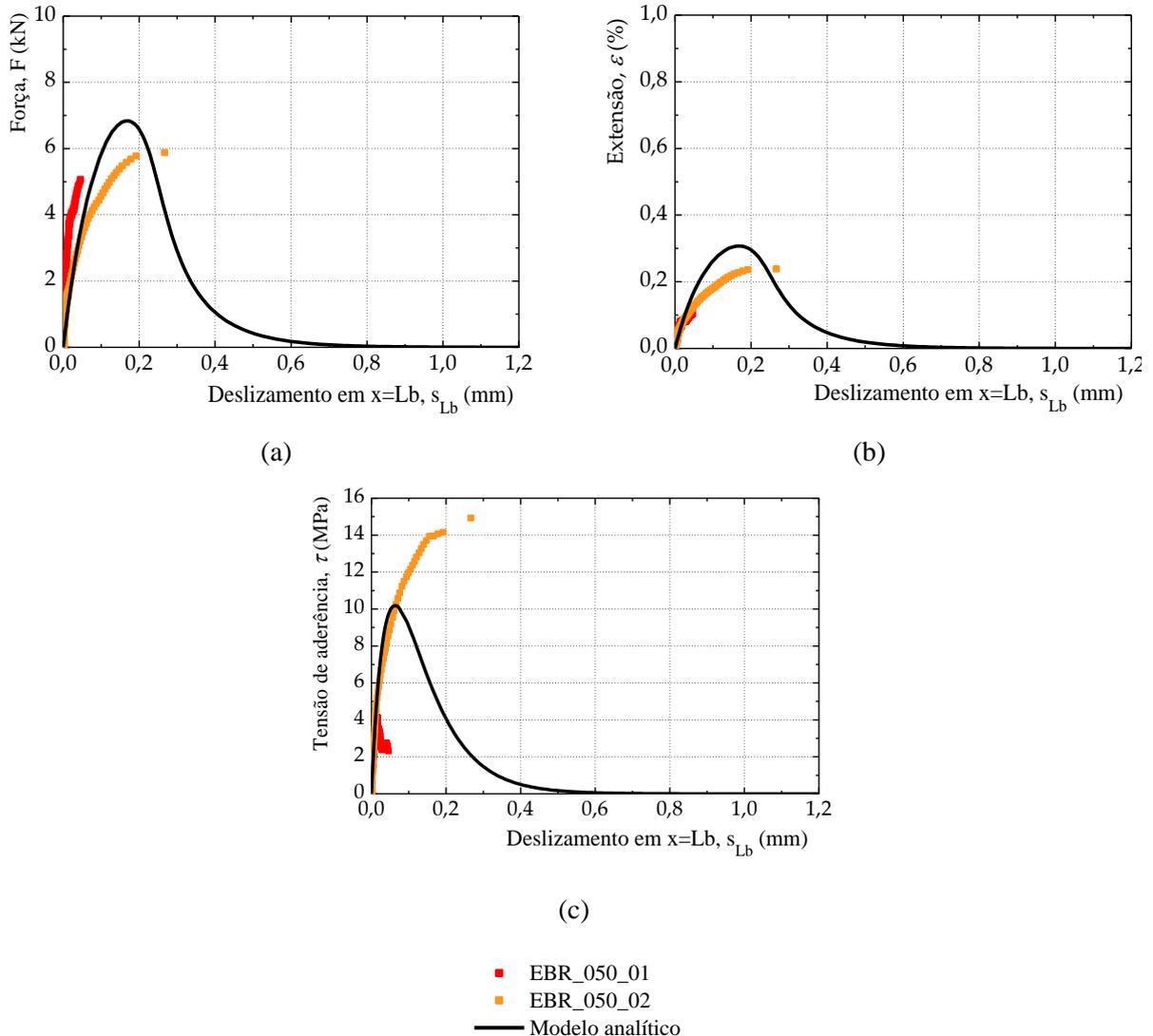


Figura 5.17 - Curvas analíticas e experimentais de força-deslizamento, extensão-deslizamento e tensão de aderência-deslizamento.

Em termos de tensões de aderência, verifica-se que a previsão do modelo analítico está longe dos dois ensaios. A tensão de aderência máxima estimada pelo modelo analítico é de 10,19 MPa, existindo um erro entre a previsão analítica e o ensaio EBR_050_01 de 59,4% e de 46,4% para o ensaio EBR_050_02.

Tal como nos casos mostrados anteriormente, a Figura 5.18 mostra as curvas força vs. deslizamento e tensão de aderência vs. deslizamento de CFRP em $x=L_b$, onde se identificam quatro pontos: A, B, C e D. Os pontos referem-se a:

- (i) Ponto A: fase em que a ligação está em regime elástico, isto é, antes de atingir a tensão de aderência máxima, τ_{max} ;
- (ii) Ponto B: fase em que a ligação atinge τ_{max} em $x=L_b$;
- (iii) Ponto C: fase em que parte da ligação perde aderência com a deformação (softening) e se atinge a força máxima analítica transmitida ao compósito de CFRP;
- (iv) Ponto D: fase em que a força analítica transmitida ao compósito de CFRP diminuiu e se atinge a força máxima para o ensaio EBR_050_02.

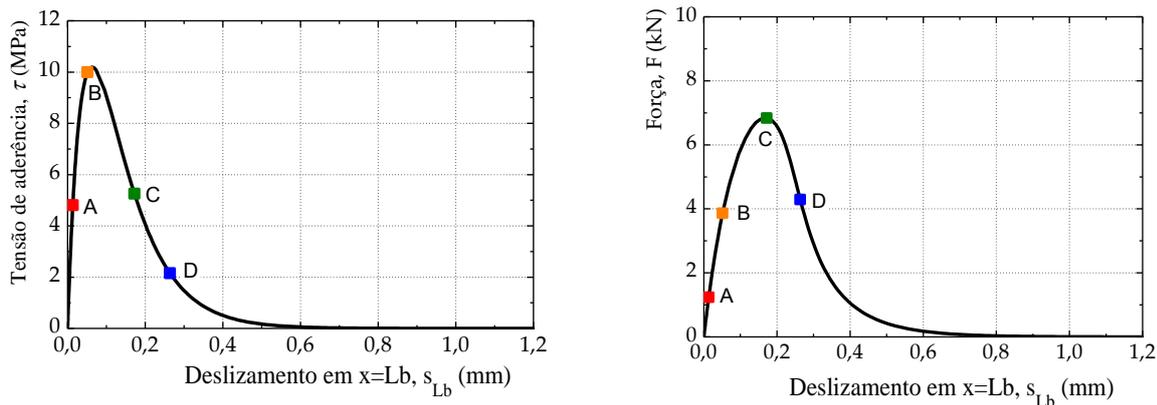


Figura 5.18 - Curvas analíticas tensão de aderência vs. deslizamento e força vs. deslizamento para um comprimento colado de 50 mm.

Ao observar a Figura 5.19(a) e (b), constata-se que as curvas analíticas para os pontos A e B se aproximam bastante bem dos valores obtidos experimentalmente. No caso das curvas de deslizamentos, nos pontos C e D, observa-se que os valores experimentais são superiores aos obtidos pelas curvas analíticas, principalmente, junto da extremidade livre. Para este comprimento, verifica-se que junto da extremidade livre os deslizamentos tomam valores diferentes de zero.

Em termos de extensões, nos pontos C e D, verifica-se que os valores experimentais destes dois pontos estão coincidentes e estão bastante distantes das curvas analíticas.

Em termos de tensões de aderência para o ensaio EBR_050_02, verifica-se que a curva analítica obtida para o ponto A apresenta um andamento parecido com os valores experimentais. No entanto, os dados experimentais são superiores. Para o ponto B, verifica-se que o andamento e os valores analíticos são próximos dos dados experimentais. Para o mesmo ensaio, EBR_050_02, para os pontos C e D, verifica-se que os valores experimentais são bastante superiores aos obtidos analiticamente. Para o ensaio EBR_05_01, verifica-se que o ponto A apresenta valores experimentais superiores aos obtidos analiticamente e o ponto B apresenta valores e um andamento experimental muito diferentes dos analíticos.

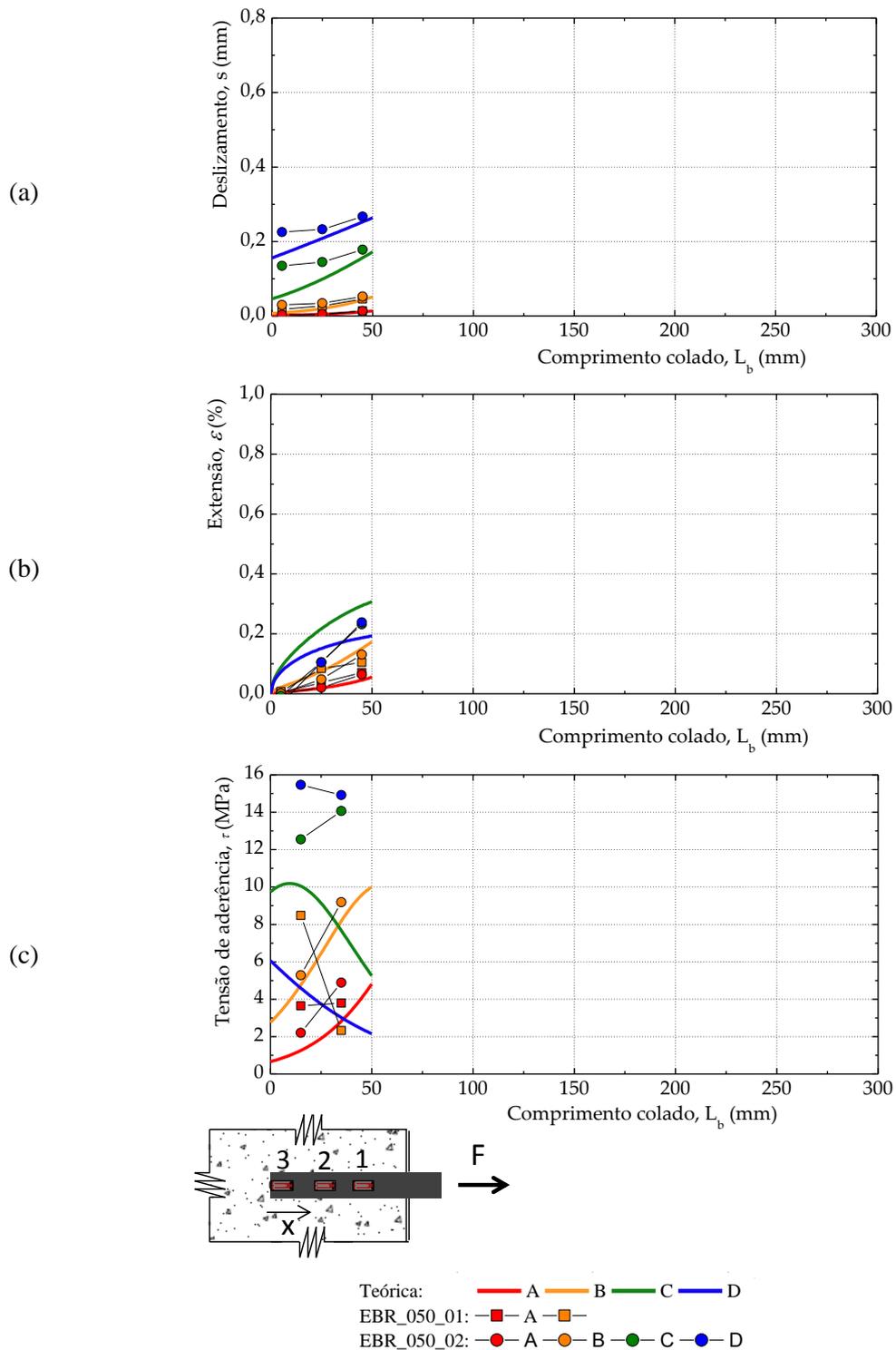


Figura 5.19 - Distribuição de deslizamento e extensões no FRP e tensões de aderência na interface ao longo do comprimento colado de 50 mm.

O gráfico da Figura 5.20 apresenta as curvas analíticas e os dados experimentais da força transmitida ao substrato de betão vs. comprimento colado para os pontos identificados na Figura 5.18. Verifica-se que para os pontos A e B as curvas analíticas se aproximam bastante dos dados

obtidos no ensaio EBR_050_02. No entanto, as curvas analíticas para os pontos C e D diferem bastante dos dados experimentais para o ensaio EBR_050_02.

Para o ensaio EBR_050_01, verifica-se que os dados obtidos experimentalmente estão bastante diferentes dos previstos pelo modelo analítico. Para este ensaio, observa-se que junto da extremidade carregada, ao contrário do que foi observado nos restantes ensaios, as forças exercidas no betão obtidas experimentalmente tomam valores superiores a zero.

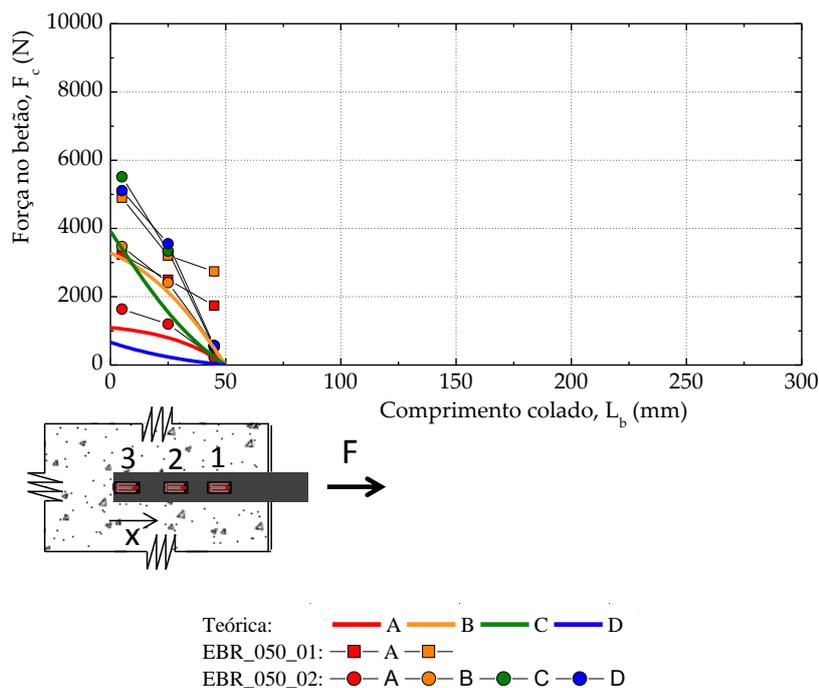


Figura 5.20 - Distribuição da força no betão ao longo do comprimento colado de 50 mm.

5.7.2. Técnica NSM

Para o modelo analítico da técnica NSM também se assumiram as características dos materiais utilizados nos ensaios experimentais do presente trabalho: $t_p = 1,4$ mm, $b_p = 10$ mm, $t_s = 300$ mm, $b_s = 300$ mm, $E_p = 159$ GPa e $E_s = 29$ GPa. Para este caso também foi necessário definir uma curva *bond-slip* que representa a interface entre o compósito de FRP e o substrato de betão. A curva *bond-slip* ficou definida através da média entre a curva *bond-slip* do ensaio NSM_200_02 e a curva do ensaio NSM_150_01.

Para o ensaio NSM_200_02 obtiveram-se os seguintes parâmetros da curva *bond-slip*: $s_{\max} = 0,162$ mm, $\tau_{\max} = 10,08$ MPa e $G_f = 4,709$ N/mm. Os parâmetros obtidos para o ensaio NSM_150_01 são: $s_{\max} = 0,055$ mm, $\tau_{\max} = 17,93$ MPa e $G_f = 2,860$ N/mm. A Figura 5.21 apresenta as curvas

bond-slip analíticas destes dois ensaios e a curva *bond-slip* média. A curva *bond-slip* média é definida pelos seguintes parâmetros: $s_{\max} = 0,109$ mm, $\tau_{\max} = 14,01$ MPa e $G_f = 3,785$ N/mm.

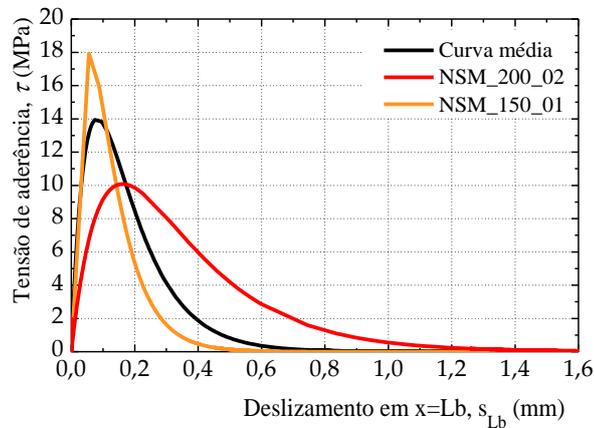


Figura 5.21 - Curvas *bond-slip* analíticas obtidas a técnica NSM.

Em seguida, apresentam-se as comparações entre os resultados obtidos a partir desta modelação e os resultados obtidos experimentalmente para os vários comprimentos colados.

5.7.2.1. Amostras com comprimento colado de 200 mm

A Figura 5.22 mostra os gráficos força-deslizamento, extensão-deslizamento e tensão de aderência-deslizamento. Nestes gráficos sobrepõem-se os resultados experimentais do ensaio NSM_200_02 com as previsões do modelo analítico para este comprimento colado. Verifica-se que, a nível de força-deslizamento, o modelo analítico apresenta um andamento parecido com os resultados experimentais, tanto do transdutor de deslizamento como da Correlação de Imagem Digital, até uma força de 17,22 kN. Depois de atingido este valor de força, o modelo analítico apresenta um patamar constante (força máxima), enquanto no ensaio experimental a força continua a aumentar até um valor máximo de 20,99 kN. Neste caso, o erro entre a previsão analítica para a força máxima e a força máxima obtida para os dados experimentais é de 21,9%. Observa-se que o modelo analítico prevê um deslizamento último, $s_{\text{ult}}=1,066$ mm, um pouco inferior aos obtidos experimentalmente, existindo um erro entre o valor analítico e o obtido pelo transdutor de deslizamento de 32,3% e de 15,6% pela Correlação de Imagem Digital.

Através da Figura 5.22(b), verifica-se que a extensão máxima estimada pelo modelo analítico, $\varepsilon_{\max}=0,77\%$, é bastante inferior à obtida experimentalmente, existindo um erro elevado de cerca de 59,7%.

A tensão de aderência máxima prevista pelo modelo analítico, 14,01 MPa, é inferior à obtida experimentalmente, verificando-se um erro de cerca de 22,8%.

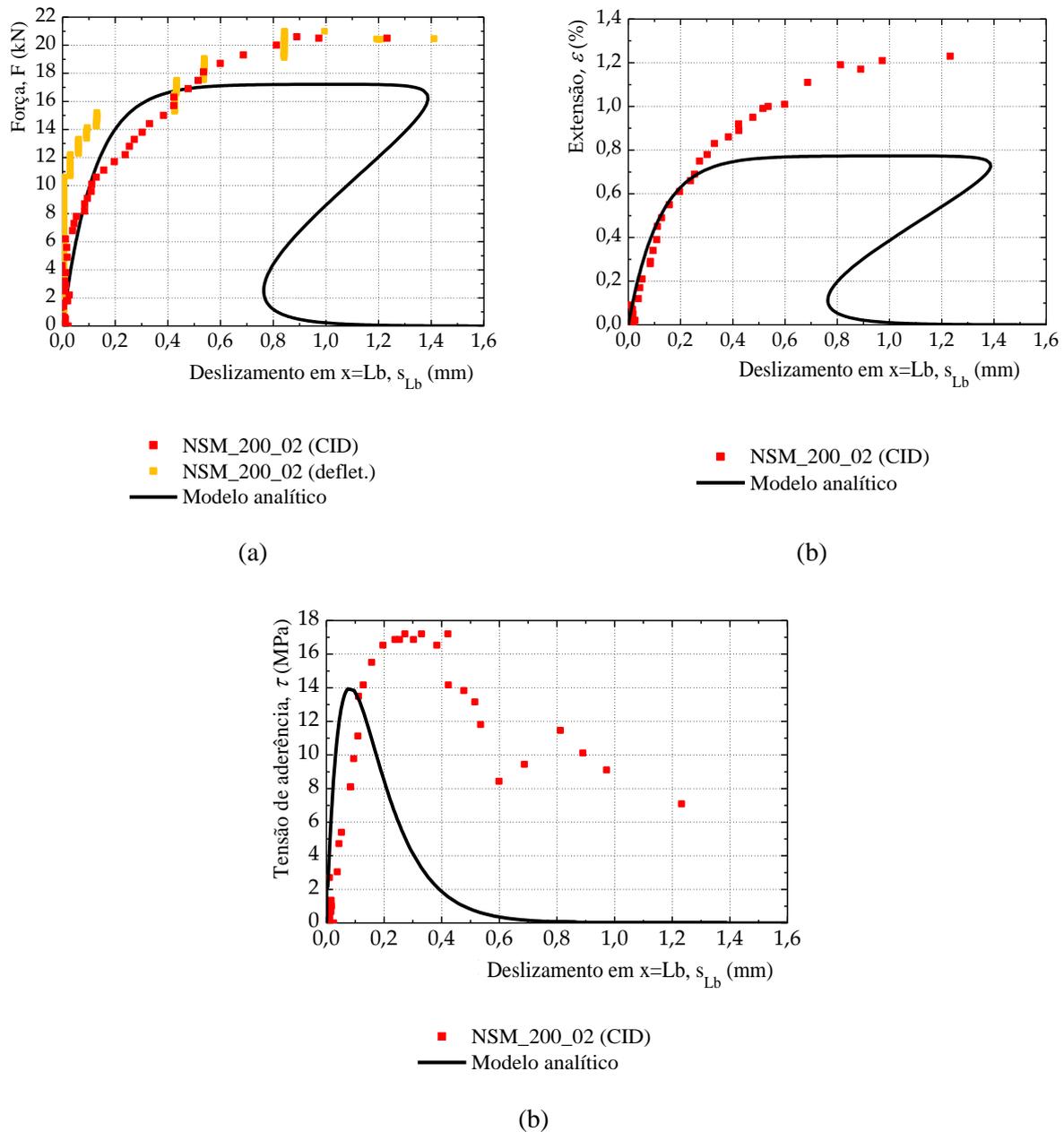


Figura 5.22 - Curvas analíticas e experimentais de força-deslizamento, extensão-deslizamento e tensão de aderência-deslizamento.

Os pontos identificados nas curvas *bond-slip* e força-deslizamento da Figura 5.23 são representados na Figura 5.24, através de deslizamentos e extensões no compósito de CFRP e tensões de aderência na interface ao longo do comprimento colado. Os pontos identificados dizem respeito a:

- (i) Ponto A: fase em que a ligação está em regime elástico, isto é, antes de atingir a tensão de aderência máxima, τ_{max} ;
- (ii) Ponto B: fase em que a ligação atinge τ_{max} em $x=L_b$;
- (iii) Ponto C: fase em que parte da ligação perde aderência com a deformação (softening);
- (iv) Ponto D: fase em que se atinge a força máxima analítica transmitida ao compósito de FRP.

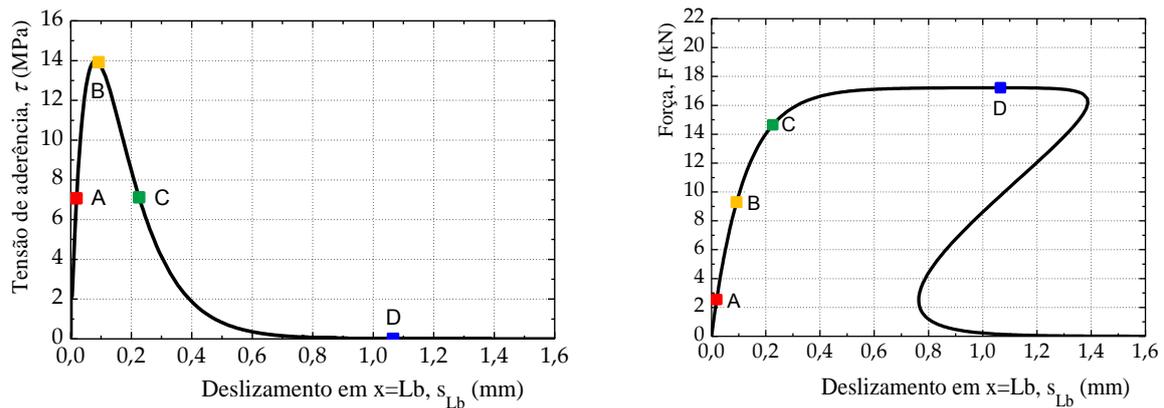


Figura 5.23 – Curvas analíticas da tensão de aderência vs. deslizamento e força vs. deslizamento para um comprimento colado de 200 mm.

Constata-se, através da Figura 5.24(a), que as curvas analíticas nos quatro pontos se aproximam relativamente bem dos valores experimentais. No entanto, para o ponto D nota-se uma maior diferença entre a previsão analítica e os dados experimentais.

Na Figura 5.24(b) observa-se que o andamento das curvas analíticas para os pontos A, B e C também se aproxima bastante dos dados obtidos experimentalmente. No entanto, no ponto D é observada uma diferença maior, junto da extremidade carregada a extensão experimental é muito superior à analítica. É normal existirem diferenças significativas nas extensões ao longo do comprimento colado para o ponto D, uma vez que na Figura 5.22(b) o gráfico de extensões vs. deslizamento apresenta grandes diferenças nos valores entre os dados experimentais e a curva analítica. Observa-se também que junto da extremidade livre, para os pontos C e D, ao contrário da previsão do modelo analítico, a extensão obtida experimentalmente não é nula.

Na Figura 5.24(c) é visível que nos pontos A e B os andamentos analítico e experimental são praticamente idênticos. No ponto C o andamento experimental é próximo do analítico, no entanto, o valor experimental é um pouco superior junto da extremidade carregada. No ponto D existem maiores diferenças entre o andamento analítico e o experimental. No entanto, o valor máximo experimental é relativamente próximo do analítico.

Tal como no caso da técnica EBR, também se estudou o que acontece no substrato de betão, determinando-se a força transmitida ao substrato. A força analítica no betão foi determinada com base na expressão (5.41), apresentada no subcapítulo 5.6. O gráfico da Figura 5.25 apresenta as curvas analíticas e os pontos experimentais da força no betão vs. comprimento colado para os pontos identificados na Figura 5.23.

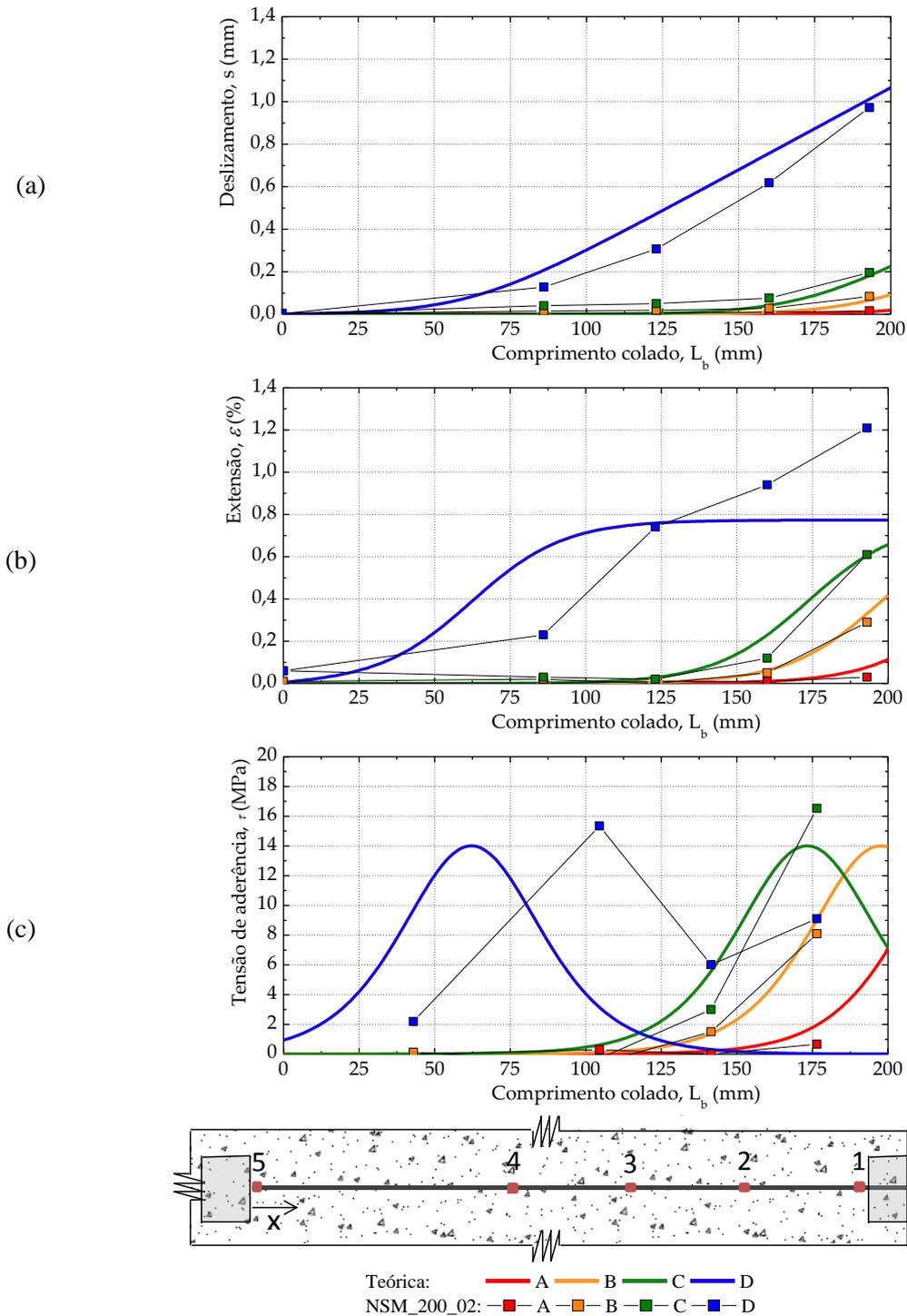


Figura 5.24 - Distribuição de deslizamento e extensões no FRP e tensões de aderência na interface ao longo do comprimento colado de 200 mm.

A Figura 5.25 mostra que junto da extremidade carregada, em $x=L_b$, as forças no betão são praticamente nulas para os pontos C e D. No entanto, nos pontos A e B, isto não se verifica, nestes pontos a força experimental transmitida ao substrato de betão é superior a zero. Junto da extremidade livre, em $x=0$, as forças no betão tomam valores máximos, que aumentam com o aumento da força transmitida ao laminado de CFRP. Verifica-se que nos pontos A, B e C os valores experimentais de força exercida no substrato são um pouco inferiores aos estimados pelo modelo analítico. Como era de esperar, no ponto D é visível a maior discrepância entre a previsão do modelo analítico e os resultados experimentais, os valores experimentais são superiores aos previstos analiticamente.

Tal como referido no subcapítulo 4.1, a técnica NSM pode ser considerada como duas técnicas EBR, isto é, assumindo metade da espessura do laminado de CFRP. Assim, a força transmitida ao betão, apresentada na Figura 5.25, refere-se a apenas um dos lados colados do compósito de CFRP.

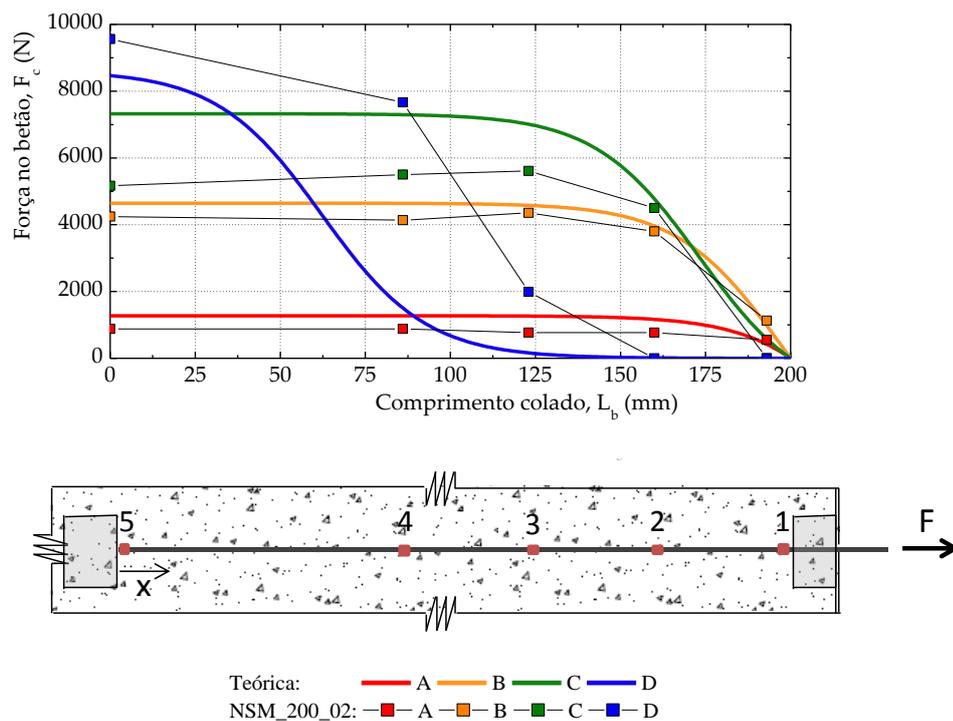


Figura 5.25 – Distribuição da força no substrato de betão ao longo do comprimento colado.

5.7.2.2. Amostras com comprimento colado de 150 mm

A Figura 5.26 mostra os gráficos força vs. deslizamento, extensão vs. deslizamento e tensão de aderência vs. deslizamento para a sobreposição dos resultados do ensaio NSM_150_01 com as previsões do modelo analítico.

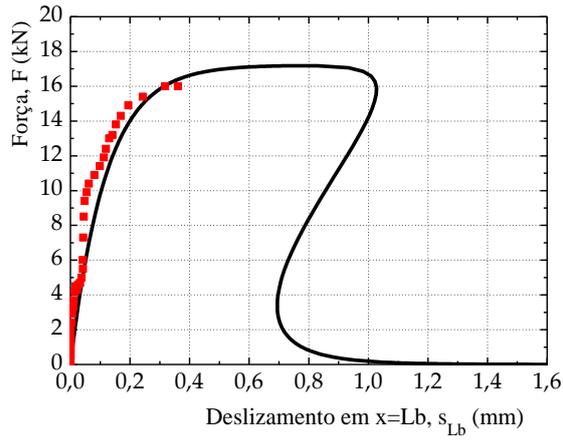
Observa-se, através da Figura 5.26(a), que os resultados experimentais obtidos pela Correlação de Imagem Digital apresentam um andamento muito próximo do andamento previsto pelo modelo analítico. No entanto, observa-se que a força máxima prevista analiticamente, $F_{max}=17,18$ kN, é um pouco superior à obtida experimentalmente, verificando-se um erro entre o modelo analítico e o ensaio experimental pequeno, de cerca de 7,2%. Verifica-se também que o deslizamento último previsto analiticamente, $s_{ult}=0,778$ mm, é bastante superior ao experimental, existindo um erro de cerca de 55,0% entre o valor analítico e o experimental.

Quanto à extensão (veja-se a Figura 5.26(b)), verifica-se também que a extensão máxima estimada pela modelo analítico, $\epsilon_{max}=0,77$ %, é muito superior à obtida experimentalmente, observando-se um erro de cerca de 53,2%. Com base na mesma figura, verifica-se que o andamento analítico está muito diferente do experimental.

A partir da Figura 5.26 (c), observa-se que os andamentos experimental e analítico são parecidos. No entanto, a tensão de aderência máxima prevista analiticamente, 14,01 MPa, é bastante superior à experimental, sendo o erro de aproximadamente 33,3%. Observa-se também que o deslizamento para o qual é obtida a tensão de aderência máxima analítica, $s_{max}=0,109$ mm, é inferior ao obtido experimentalmente, o erro entre o deslizamento máximo analítico e o experimental é bastante grande, 75,2%.

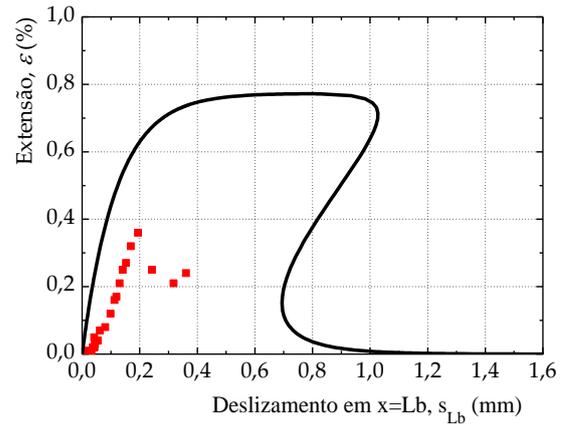
Os pontos identificados nas curvas *bond-slip* e força-deslizamento da Figura 5.27 são representados na Figura 5.28 através de deslizamentos e extensões no compósito de FRP e tensões de aderência na interface entre o FRP e o betão ao longo do comprimento colado. Os pontos identificados dizem respeito a:

- (i) Ponto A: fase em que a ligação está em regime elástico, isto é, antes de atingir a tensão de aderência máxima, τ_{max} ;
- (ii) Ponto B: fase em que a ligação atinge τ_{max} em $x=L_b$;
- (iii) Ponto C: fase em que parte da ligação perde aderência com a deformação (softening);
- (iv) Ponto D: fase em que se atinge a força máxima analítica transmitida ao compósito de FRP.



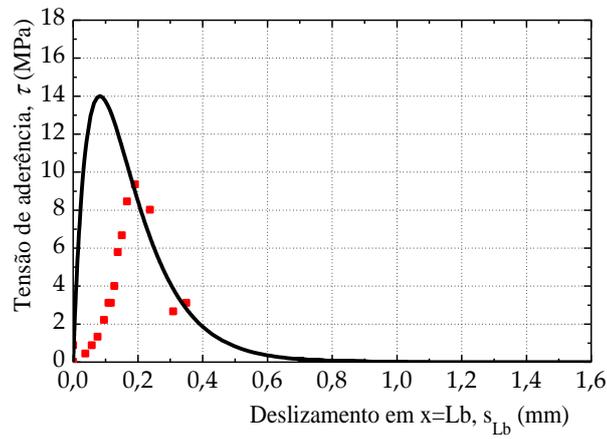
■ NSM_150_01 (ID)
 — Modelo analítico

(a)



■ NSM_150_01
 — Modelo analítico

(b)



■ NSM_150_01
 — Modelo analítico

(c)

Figura 5.26 - Curvas analíticas e experimentais de força-deslizamento, extensão-deslizamento e tensão de aderência-deslizamento.

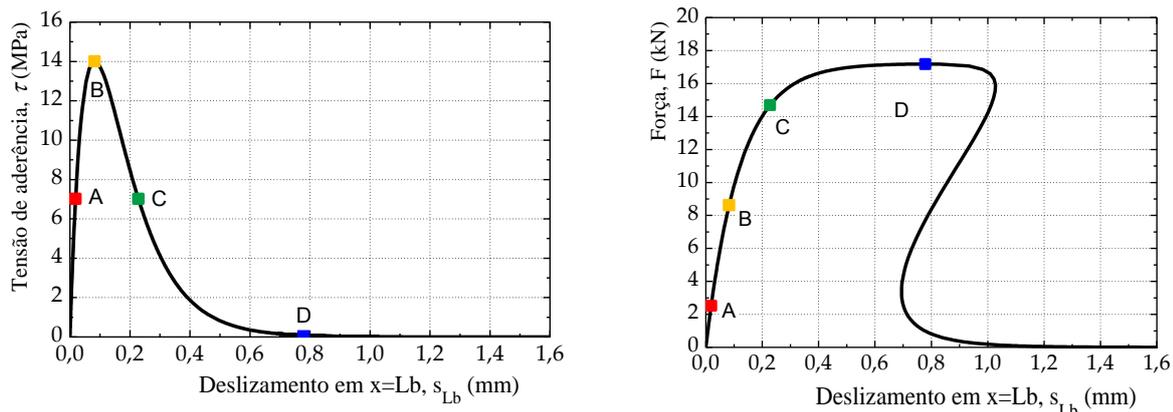


Figura 5.27 – Curvas analíticas tensão de aderência vs. deslizamento e força vs. deslizamento para um comprimento colado de 150 mm.

Constata-se que, no ponto A, a curva analítica de deslizamento (veja-se a Figura 5.28 (a)) se aproxima bastante bem dos dados experimentais. Nos pontos B e C, a curva analítica apresenta alguma discrepância em relação aos dados experimentais, nestes pontos verifica-se que, na extremidade livre, o deslizamento analítico é nulo e experimentalmente existem valores superiores a zero.

No gráfico de extensões ao longo do comprimento colado (veja-se a Figura 5.28 (b)) os andamentos das curvas analíticas para os pontos A, B e C estão bastante diferentes dos andamentos dos dados experimentais. Esta discrepância nas extensões já era de esperar, uma vez que, na Figura 5.26(b), a curva experimental está bastante distante da curva do modelo analítico.

No gráfico das tensões de aderência (veja-se Figura 5.28 (c)) é visível que o ponto C é o ponto com maiores discrepâncias entre o modelo analítico e os dados experimentais. No entanto, os pontos A e B também não apresentam andamentos analíticos parecidos com os experimentais, o que já era de esperar, uma vez que as extensões também apresentaram grandes discrepâncias.

O gráfico da Figura 5.29 apresenta as curvas analíticas e os pontos experimentais da força no betão vs. comprimento colado para os pontos identificados na Figura 5.27.

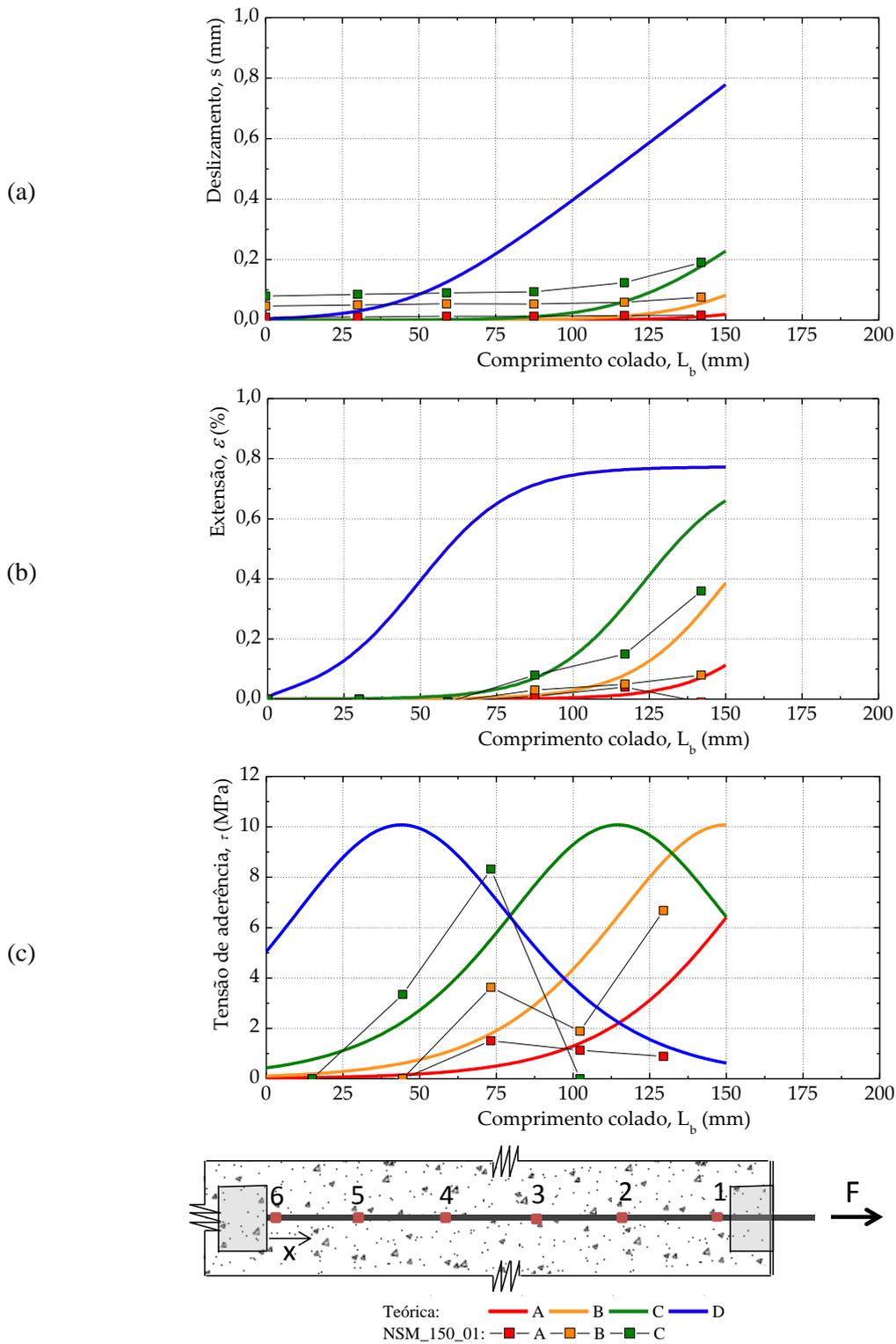


Figura 5.28 - Distribuição de deslizamento e extensões no FRP e tensões de aderência na interface ao longo do comprimento colado de 150 mm.

A Figura 5.29 mostra que junto da extremidade carregada, em $x=L_b$, as forças no betão analíticas são nulas nos quatro pontos. No entanto, experimentalmente isto não se verificou, nos pontos A, B e C na extremidade carregada a força experimental transmitida ao substrato de betão é bastante

superior a zero. Verifica-se também que experimentalmente, nos pontos A e B, as forças transmitidas ao substrato são praticamente constantes ao longo do comprimento colado e são sempre superiores às previstas pelo modelo analítico. No ponto C, verifica-se que, junto da extremidade livre, os valores experimentais são muito próximos dos previstos analiticamente.

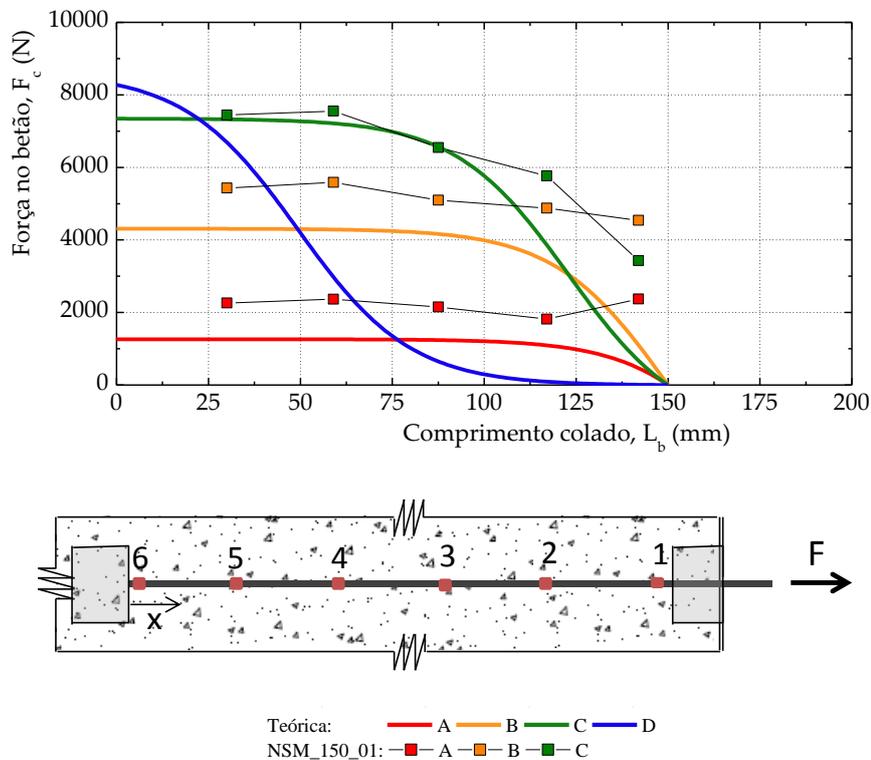


Figura 5.29 – Distribuição da força no substrato de betão ao longo do comprimento colado.

5.7.2.3. Amostras com comprimento colado de 100 mm

A Figura 5.30 mostra os gráficos força-deslizamento, extensão-deslizamento e tensão de aderência-deslizamento. Nestes gráficos, faz-se uma sobreposição dos resultados do ensaio NSM_100_02 com as previsões do modelo analítico. A Figura 5.30(a) mostra que a curva obtida pela Correlação de Imagem Digital apresenta um andamento muito próximo ao do modelo analítico. No entanto, o andamento da curva obtida pelo transdutor de deslizamento apresenta um andamento muito diferente do previsto pelo modelo analítico e pelo método de Correlação de Imagem Digital, podendo, assim, afirmar-se que, neste caso, o transdutor de deslizamento obteve deslizamentos muito irrealistas.

Observa-se também que a força máxima prevista pelo modelo analítico, $F_{max}=16,91$ kN, é inferior à obtida experimentalmente, existe um erro entre a força máxima analítica e a experimental de

16,0%. O deslizamento último analítico, $s_{ult}=0,530$ mm, é superior ao deslizamento obtido pelo método de Correlação de Imagem Digital, existe um erro entre os dois de cerca de 32,4%.

Em termos de extensões (veja-se a Figura 5.30 (b)), verifica-se que a extensão máxima obtida analiticamente, $\varepsilon_{max}=0,76\%$, é bastante superior à experimente, observa-se um erro entre as duas de 60.5%.

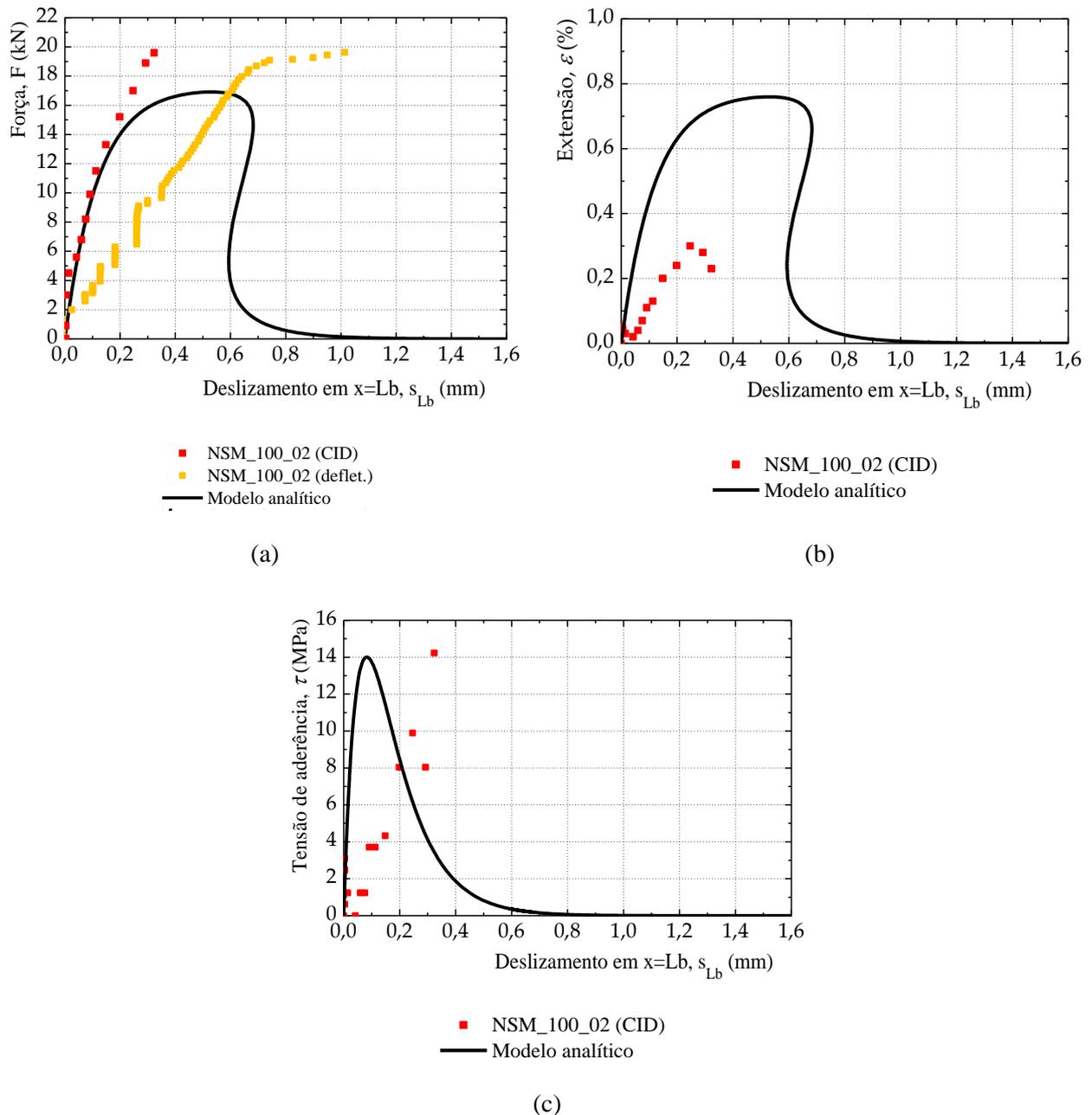


Figura 5.30 - Curvas analíticas e experimentais de força-deslizamento, extensão-deslizamento e tensão de aderência-deslizamento.

A tensão de aderência máxima prevista pelo modelo analítico, 14,01 MPa, é da mesma ordem de grandeza da obtida experimentalmente, existe um erro entre as duas de apenas 1,5%. No entanto, os deslizamentos máximos são muito diferentes.

Os pontos identificados nas curvas *bond-slip* e força-deslizamento da Figura 5.31 são representados na Figura 5.32, através de deslizamentos e extensões no compósito de CFRP e tensões de aderência na interface entre o CFRP e o betão ao longo do comprimento colado. Os pontos identificados dizem respeito a:

- (i) Ponto A: fase em que a ligação está em regime elástico, isto é, antes de atingir a tensão de aderência máxima, τ_{max} ;
- (ii) Ponto B: fase em que a ligação atinge τ_{max} em $x=L_b$;
- (iii) Ponto C: fase em que parte da ligação perde aderência com a deformação (softening);
- (iv) Ponto D: fase em que se atinge a força máxima analítica transmitida ao compósito de FRP.

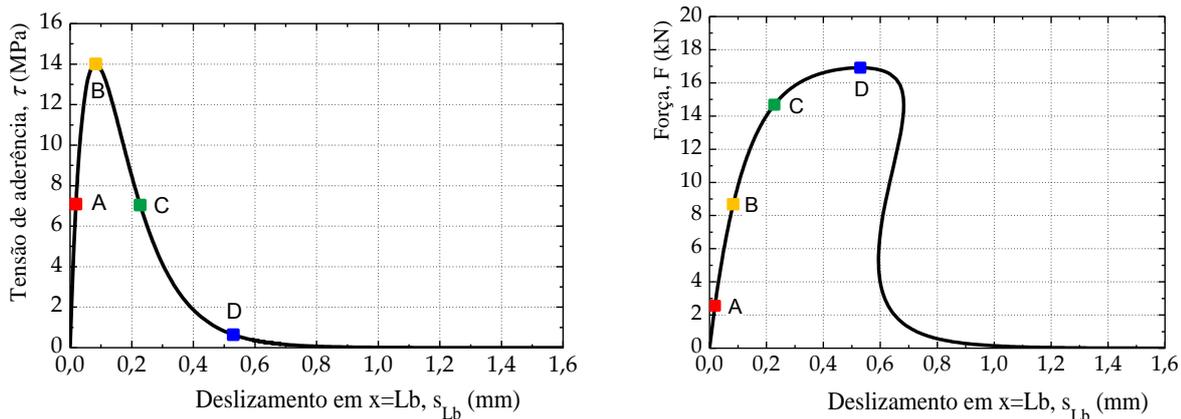


Figura 5.31 – Curvas analíticas tensão de aderência vs. deslizamento e força vs. deslizamento para um comprimento colado de 100 mm.

Através da análise da curva da Figura 5.32(a), constata-se que nos pontos A, B e C os deslizamentos experimentais ao longo do comprimento se mantêm praticamente constantes, os deslizamentos experimentais só são próximos dos analíticos junto da extremidade carregada.

No gráfico de extensões ao longo do comprimento colado (veja-se a Figura 5.32 (b)) o andamento da curva analítica para os pontos A, B e C é bastante diferente do andamento dos dados experimentais. Esta discrepância nas extensões já era de esperar, uma vez que, na Figura 5.30(b), a curva experimental está bastante distante da curva do modelo analítico.

No gráfico das tensões de aderência (veja-se Figura 5.32(c)) é visível que em nenhum dos pontos o andamento experimental é próximo do analítico, o que já era de esperar, uma vez que as extensões analíticas e experimentais também são muito diferentes.

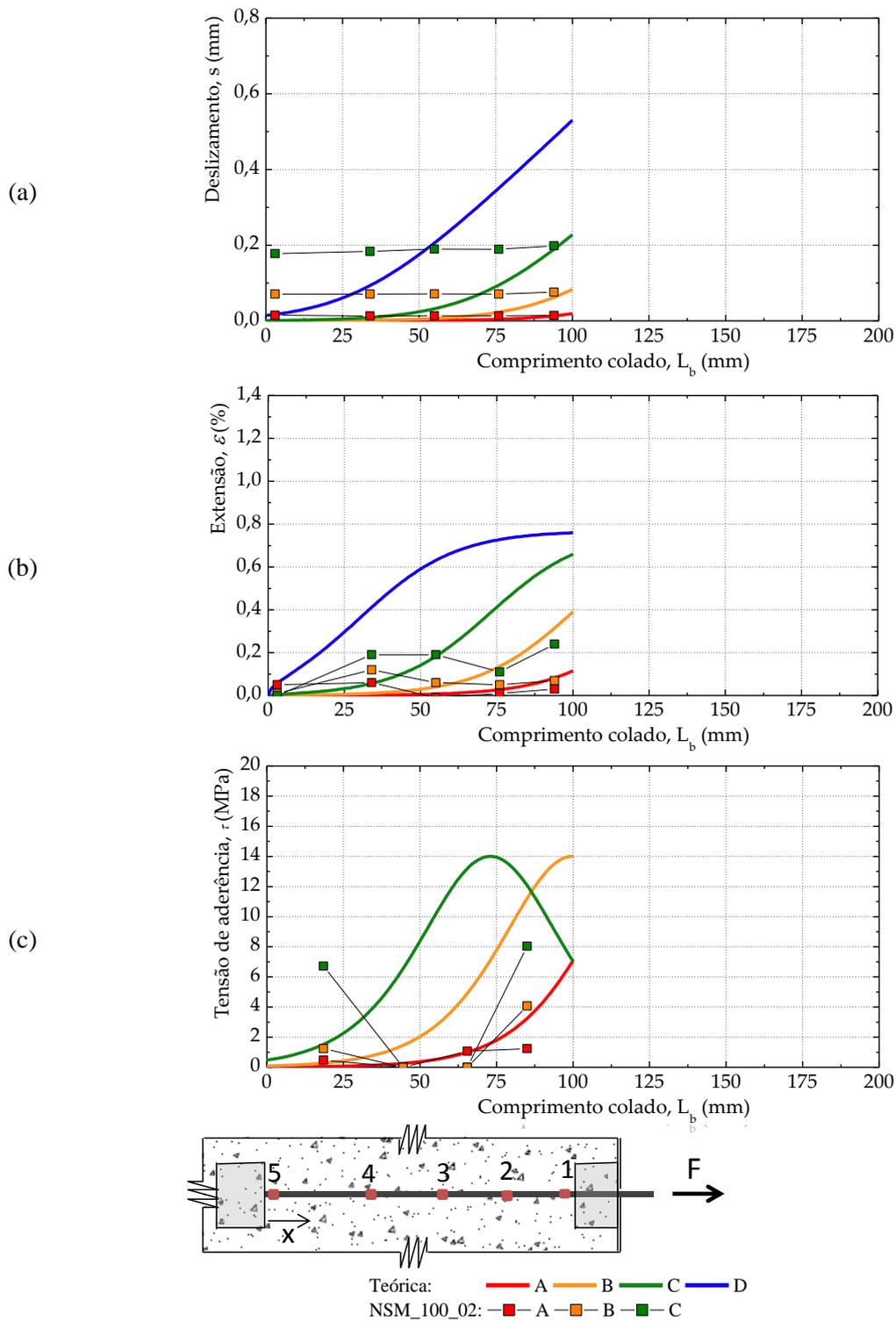


Figura 5.32 - Distribuição de deslizamento e extensões no FRP e tensões de aderência na interface ao longo do comprimento colado de 150 mm.

O gráfico da Figura 5.33 apresenta as curvas analíticas e os pontos experimentais da força no betão vs. comprimento colado para os pontos identificados na Figura 5.31.

A Figura 5.33 mostra que junto da extremidade carregada, em $x=L_b$, as forças no betão analíticas são nulas nos quatro pontos, no entanto, tal como no caso anterior, experimentalmente isto não se verifica, para os pontos A, B e C as forças experimentais transmitidas ao substrato de betão são bastante superiores a zero. Verifica-se também que experimentalmente, nos pontos A e B, as forças transmitidas ao substrato são praticamente constantes ao longo do comprimento colado. Nos pontos A, B e C, os dados experimentais são próximos dos analíticos junto da extremidade livre, no restante comprimento colado verificam-se andamentos experimentais muito diferentes dos previstos analiticamente.

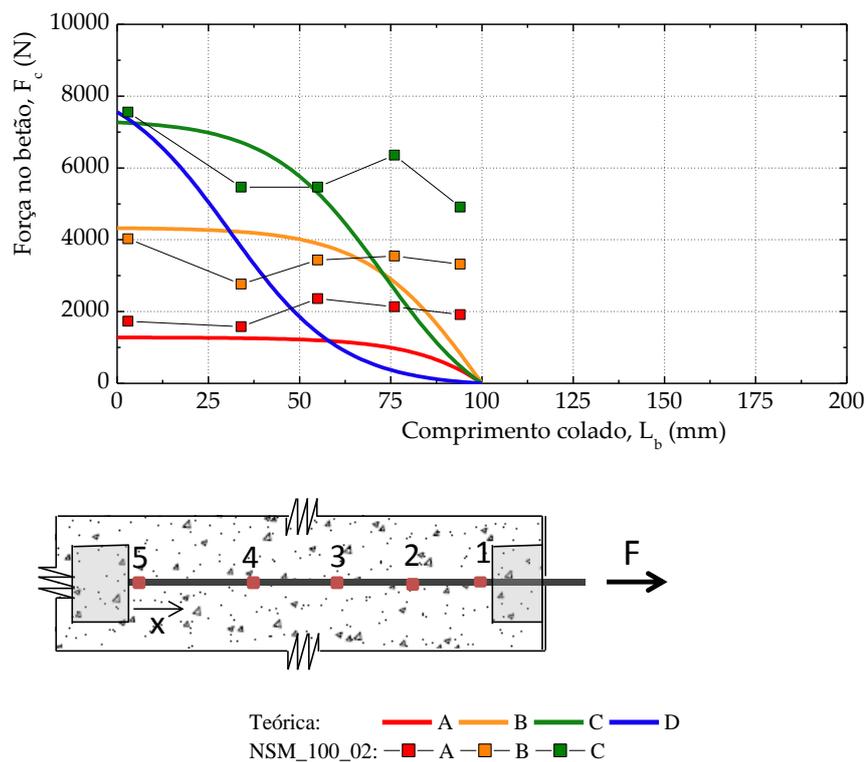


Figura 5.33 – Distribuição da força no substrato de betão ao longo do comprimento colado.

5.7.2.4. Amostras com comprimento colado de 50 mm

A Figura 5.34 mostra os gráficos força vs. deslizamento, extensão vs. deslizamento e tensão de aderência vs. deslizamento. Nestes gráficos é feita a sobreposição dos resultados experimentais para o ensaio NSM_050_03 com as previsões do modelo analítico.

Verifica-se que a nível de força vs. deslizamento (veja-se a Figura 5.34 (a)), os resultados experimentais obtidos pela Correlação de Imagem Digital e pelo transdutor de deslizamento apresentam um andamento parecido ao andamento do modelo analítico. No entanto, observa-se que a força máxima prevista analiticamente, $F_{max}=14,84$ kN, é bastante superior à experimental,

observa-se um erro entre as duas de 37,9%. Verifica-se também que o deslizamento último analítico, $s_{ult}=0,286$ mm, é superior aos experimentais, observa-se um erro entre o deslizamento último analítico e o obtido pela Correlação de Imagem Digital de 36,0% e de 27,6% para o transdutor de deslizamento.

Quanto à extensão (veja-se a Figura 5.34 (b)), observa-se, novamente, que os andamentos experimental e analítico estão afastados e que a extensão máxima estimada pela modelo analítico, $\epsilon_{max}=0,67\%$ é bastante superior à obtida experimentalmente, o erro entre as duas é de 62,7%.

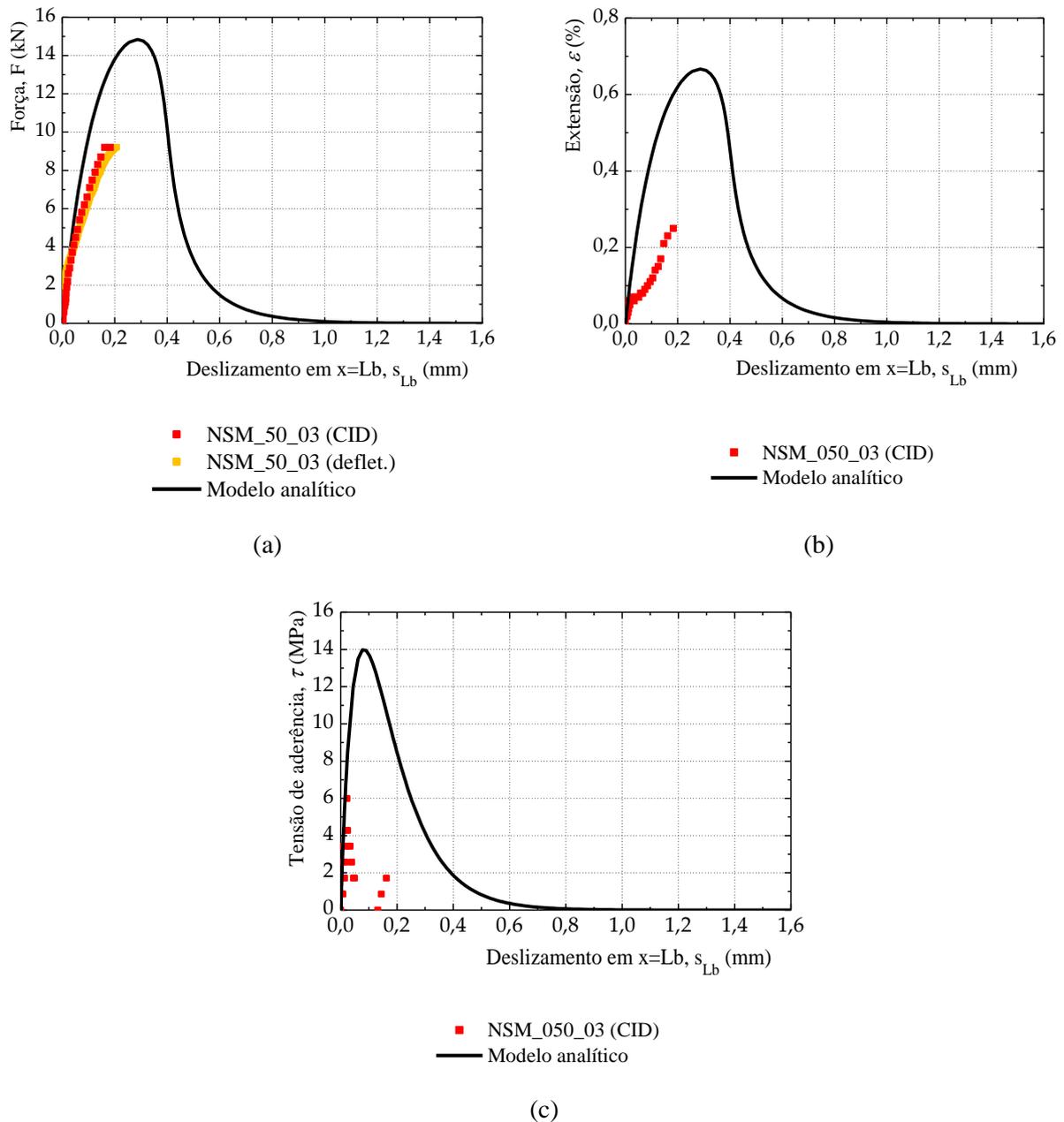


Figura 5.34 - Curvas analíticas e experimentais de força-deslizamento, extensão-deslizamento e tensão de aderência-deslizamento.

Através da Figura 5.34 (c), observa-se que a tensão de aderência máxima prevista analiticamente, 14,01 MPa, tem um valor superior ao obtido experimentalmente, existe um erro entre as duas de 57,2%.

Os pontos identificados nas curvas *bond-slip* e força-deslizamento da Figura 5.35 são representados na Figura 5.36, através de deslizamentos e extensões no compósito de CFRP e tensões de aderência na interface entre o CFRP e o betão ao longo do comprimento colado. Os pontos identificados dizem respeito a:

- (i) Ponto A: fase em que a ligação está em regime elástico, isto é, antes de atingir a tensão de aderência máxima, τ_{max} ;
- (ii) Ponto B: fase em que a ligação atinge τ_{max} em $x=L_b$;
- (iii) Ponto C: fase em que parte da ligação perde aderência com a deformação (softening);
- (iv) Ponto D: fase em que se atinge a força máxima transmitida ao compósito de FRP.

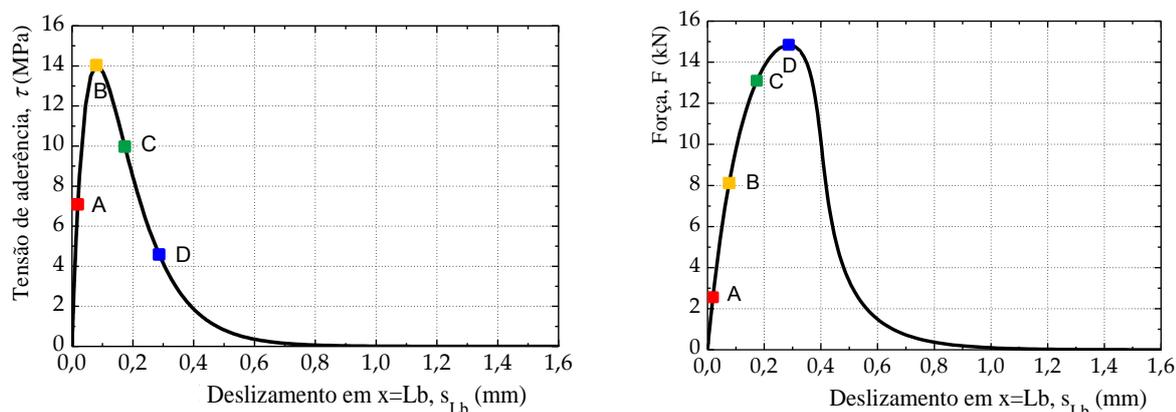


Figura 5.35 – Curvas analíticas tensão de aderência vs. deslizamento e força vs. deslizamento para um comprimento colado de 50 mm.

A Figura 5.36 (a) mostra que, nos pontos A, B e C, os deslizamentos experimentais ao longo do comprimento são superiores aos previstos pelo modelo analítico. Nos pontos A e B, junto da extremidade livre, os deslizamento previsto pelo modelo analítico são praticamente nulos, enquanto nos dados experimentais são superiores a zero.

No gráfico de extensões ao longo do comprimento colado (veja-se a Figura 5.36 (b)), os dados experimentais são relativamente próximos das previsões do modelo analítico no ponto A. No ponto B, os dados experimentais também são relativamente próximos, exceto junto da extremidade carregada. No ponto C, verifica-se uma discrepância maior entre os dados experimentais e o modelo analítico.

Quanto às tensões de aderência (veja-se a Figura 5.36 (c)), observa-se que apenas no ponto A os dados experimentais são próximos dos analíticos, nos pontos B e C são visíveis discrepâncias significativas entre o modelo analítico e os dados experimentais.

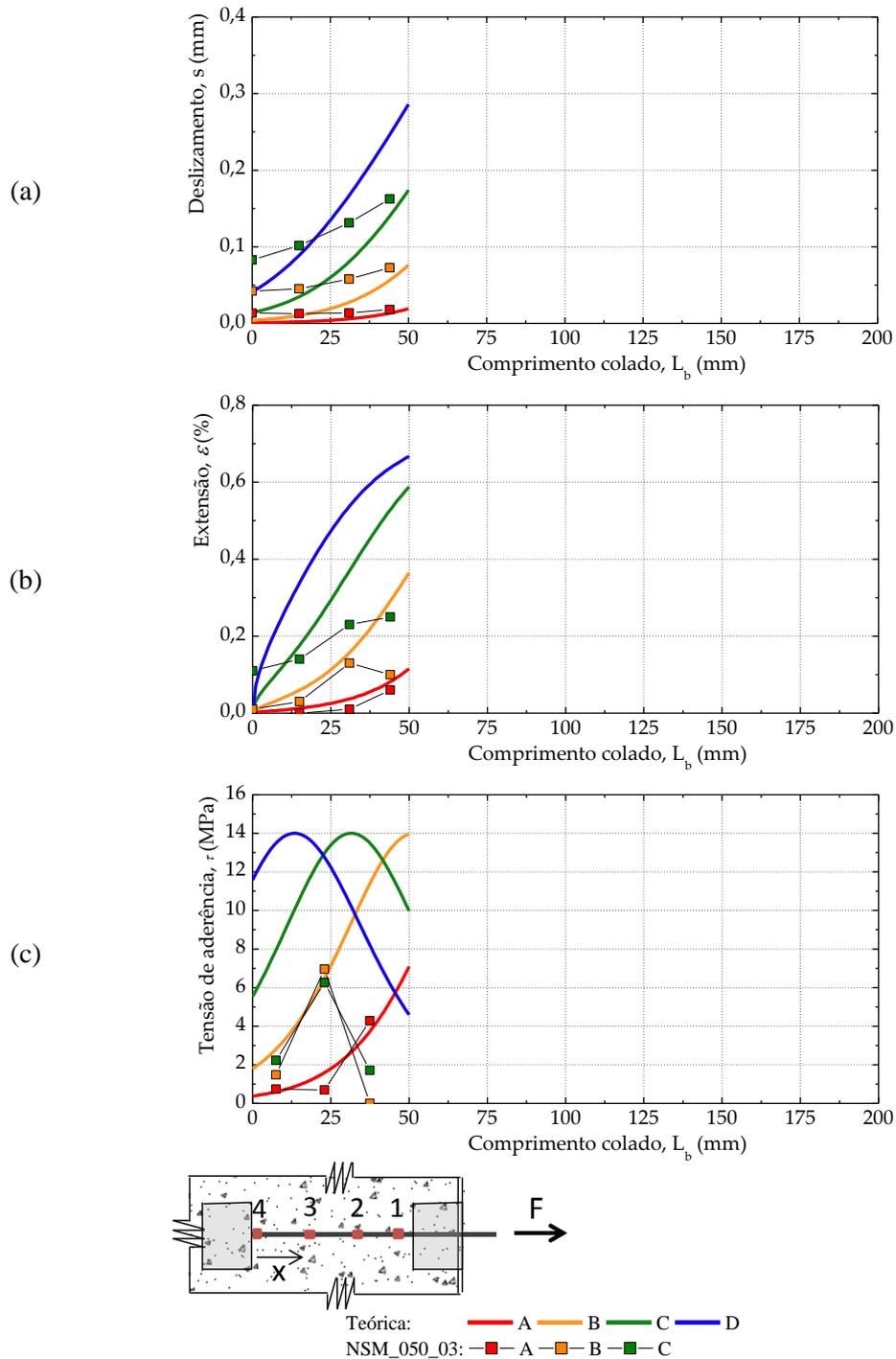


Figura 5.36 - Distribuição de deslizamento e extensões no FRP e tensões de aderência na interface ao longo do comprimento colado de 50 mm.

O gráfico da Figura 5.37 apresenta as curvas analíticas e os pontos experimentais da força no betão vs. comprimento colado para os pontos identificados na Figura 5.35.

A Figura 5.37 mostra que junto da extremidade carregada, em $x=L_b$, as forças no betão analíticas são nulas nos quatro pontos. No entanto, nos pontos B e C, experimentalmente isto não se verifica, a força experimental transmitida ao substrato de betão é bastante superior a zero. No ponto A, observa-se que os dados experimentais se sobrepõem à curva prevista analiticamente, enquanto nos pontos B e C se observa uma discrepância significativa entre os dados experimentais e as curvas analíticas.

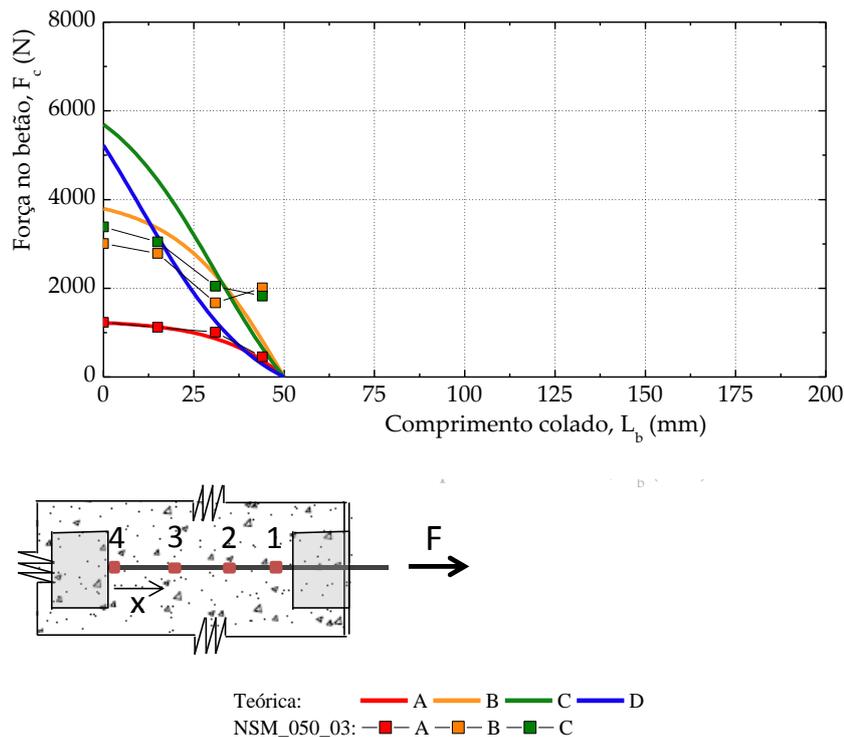


Figura 5.37 – Distribuição da força no substrato de betão ao longo do comprimento colado.

5.7.3. Comparação entre as técnicas EBR e NSM

A Figura 5.38 apresenta as forças máximas obtidas para as técnicas EBR e NSM para cada ensaio experimental realizado. Ao mesmo tempo, calcularam-se as forças máximas a partir do modelo analítico para diferentes comprimentos colados e cujos resultados estão apresentados também na Figura 5.38.

Analisando a Figura 5.38, constata-se que, para a técnica EBR, grande parte dos valores de força máxima obtidos experimentalmente são ligeiramente mais baixos do que os previstos através do modelo analítico. Para esta técnica, o erro entre a força máxima analítica e experimental foi máximo para os ensaios EBR_50_01 e EBR_100_01, com erros de 25,9% e 25,4%, respetivamente.

Para a técnica NSM, verifica-se que para os comprimentos de 100 e 200 mm as forças máximas experimentais são as duas da mesma ordem de grandeza e são bastante superiores às estimadas pelo modelo analítico. Observa-se que o erro entre a força máxima analítica e experimental foi máximo para o ensaio NSM_050_03, com um valor de 37,9%.

Verifica-se que os valores de força máxima que se conseguem introduzir no sistema de reforço pela técnica NSM são praticamente o dobro dos que se conseguem introduzir no sistema pela técnica EBR.

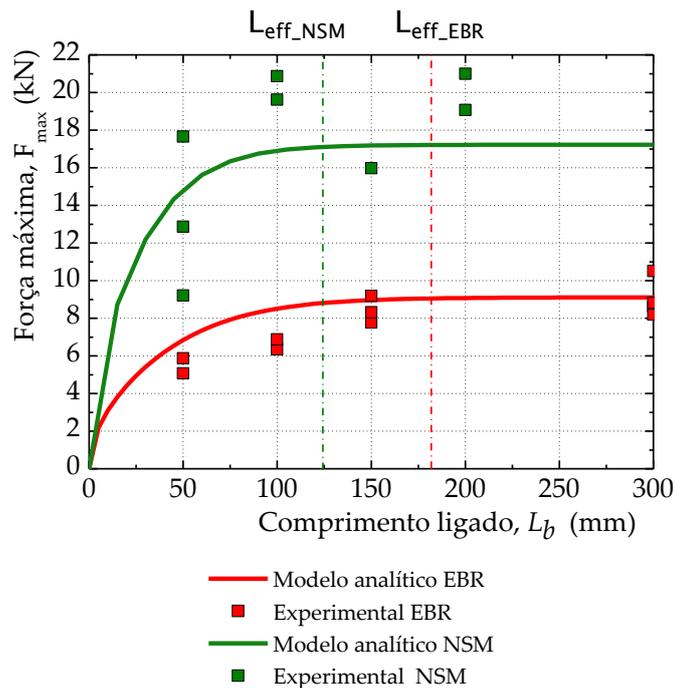


Figura 5.38 – Gráfico força máxima vs. comprimento ligado.

Como já foi referido anteriormente, a partir do gráfico força máxima vs. deslocamento é possível encontrar o comprimento efetivo da ligação. No subcapítulo 5.5, já se havia constatado que, através da curva analítica, a técnica EBR apresentava um comprimento efetivo da ligação de cerca de 185 mm. Olhando para os resultados experimentais relativos à técnica EBR, observa-se que o comprimento de 150 mm apresenta valores de força máxima da mesma ordem de grandeza dos obtidos para um comprimento de 300 mm, ou seja, pode-se considerar que o comprimento efetivo da ligação observado experimentalmente deve rondar os 150 mm. Conforme referido anteriormente, o comprimento efetivo da ligação para a técnica EBR é, de acordo com o Boletim 14 da FIB [29], de 242.0 mm. Conclui-se pois, que o Boletim 14 da FIB [29] sobrestima demasiado o valor do comprimento efetivo da ligação.

Para a técnica NSM, através da Figura 5.38, observa-se que os resultados experimentais obtidos para um comprimento colado de 100 mm são da mesma ordem de grandeza dos obtidos para um

comprimento de 200, podendo-se concluir que o comprimento colado de 100 mm é igual ou superior ao comprimento de ligação efetivo. Através da curva analítica, observa-se que o comprimento de ligação efetivo ronda os 125 mm. No subcapítulo 4.1.2, através de expressões analíticas propostas por Biscaia et al. [11], verificou-se que o comprimento efetivo da ligação é de cerca de 171 mm.

Em termos de comprimento efetivo da ligação, verifica-se também que, como era de esperar, o comprimento efetivo da ligação pela técnica NSM é inferior ao da técnica EBR. No subcapítulo 4.1.2, através das equações analíticas de Biscaia et al. [11], percebeu-se que o comprimento efetivo da ligação da técnica NSM seria 71% do comprimento de ligação efetivo da técnica EBR. Para o presente estudo, com base nos resultados experimentais e analíticos presentes na Figura 5.38, constata-se que o comprimento efetivo da ligação da técnica NSM é de cerca de 67% do comprimento da técnica EBR. Deste modo, observa-se que as equações analíticas propostas por Biscaia et al. [11] preveem valores de comprimento efetivo próximos do modelo analítico e dos resultados experimentais obtidos para este trabalho.

A Figura 5.39 apresenta os deslizamentos últimos máximas na extremidade carregada obtidos para as técnicas duas técnicas, EBR e NSM. São apresentados dados de cada ensaio experimental e do modelo analítico para diferentes comprimentos colados.

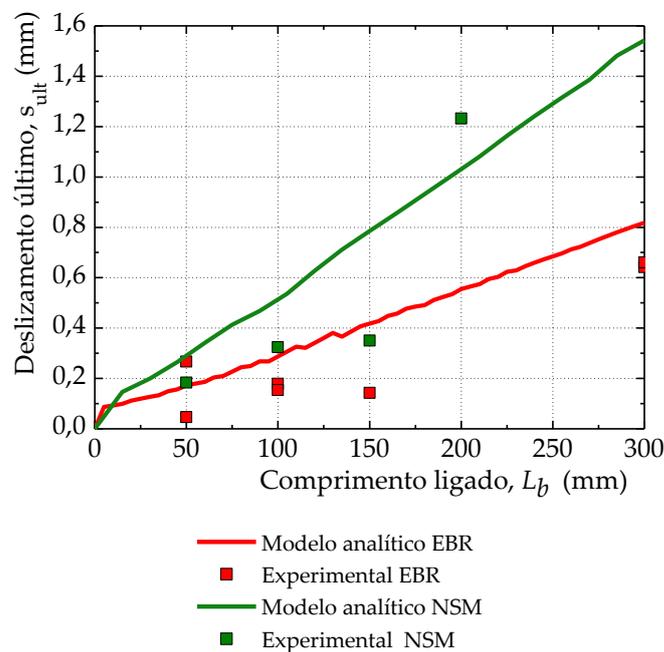


Figura 5.39 - Gráfico deslizamento último na extremidade carregada vs. comprimento ligado.

Através da Figura 5.39, observa-se que, para a técnica EBR, os valores de deslizamento último obtidos experimentalmente são praticamente sempre inferiores aos previstos pelo modelo analítico, existindo apenas um valor experimental superior para um comprimento colado de 50 mm. Para a

técnica NSM, observa-se também que os valores experimentais são normalmente inferiores aos previstos pelo modelo analítico, o único valor de deslizamento último experimental superior ao analítico ocorre para um comprimento colado de 200 mm.

Verifica-se ainda, através da Figura 5.39, que o modelo analítico prevê que os deslizamentos últimos da técnica NSM sejam superiores aos da técnica EBR. Para os dados experimentais também se observa que os valores da técnica NSM são normalmente superiores aos da técnica EBR, o que nos leva a concluir que na técnica NSM as roturas são mais dúcteis, havendo maior deformação.

5.7.4. Comparação com o modelo analítico proposto por Ueda e Dai

No subcapítulo 2.8.2 apresentou-se o modelo analítico proposto por Ueda e Dai [20] que, tal como referido, é válido apenas nos casos em que o comprimento colado é superior ao comprimento efetivo da ligação.

Na Figura 5.40 apresentam-se dois gráficos força vs. deslizamento para dois comprimentos diferentes, um comprimento colado superior ao efetivo, 300 mm, e um inferior ao efetivo, 100 mm. Os gráficos foram obtidos para os parâmetros referidos no subcapítulo 5.7.1 para a técnica EBR.

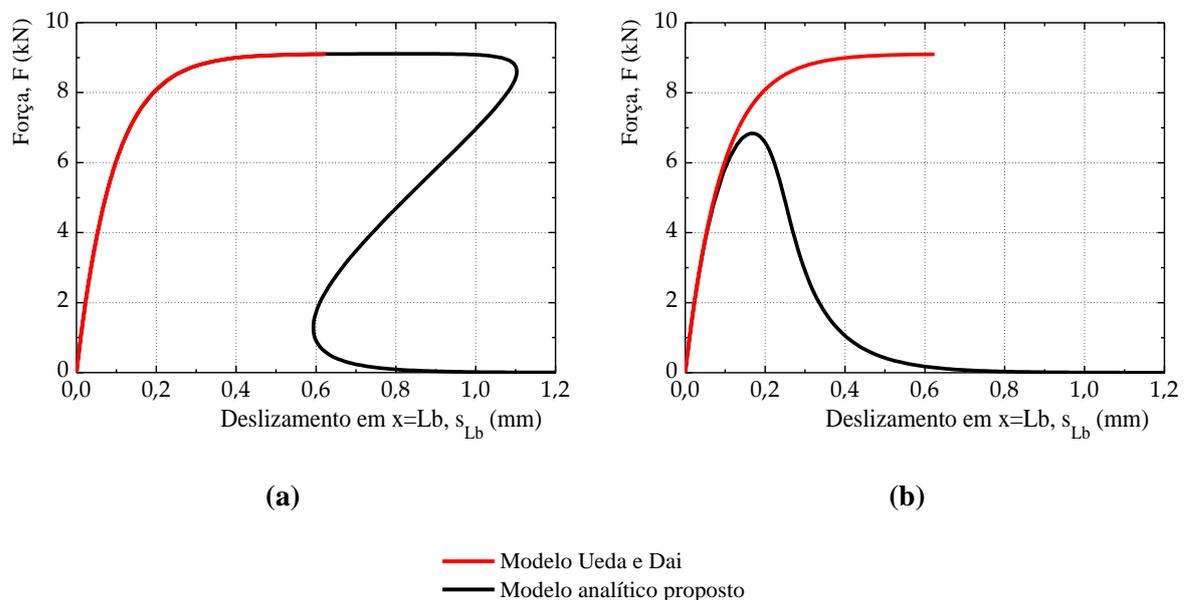


Figura 5.40 - Curvas força vs. deslizamento: (a) comprimento colado de 300 mm; e (b) comprimento colado de 100 mm..

A partir da Figura 5.40(a) constata-se que os dois modelos são idênticos até ser atingida a força máxima. Depois de atingida a força máxima, o modelo de Ueda e Dai [20] não consegue prever o comportamento do sistema de reforço, enquanto o modelo analítico proposto consegue prever o pós-colapso.

Para o comprimento colado inferior ao efetivo, veja-se a Figura 5.40(b), o modelo de Ueda e Dai [20] apresenta uma curva idêntica à apresentada para um comprimento superior ao efetivo, ou seja, o modelo de Ueda e Dai [20] não consegue prever a força máxima imposta ao laminado de FRP para comprimentos pequenos. Por outro lado, o modelo analítico proposto consegue prever a força máxima para comprimentos pequenos e para este caso consegue também prever o pós-colapso.

5.7.5. Comparação com Biscaia et al.

Como não se conhecem modelos analíticos não lineares que consigam estimar o processo de descolamento do compósito de FRP do material a reforçar considerando modelos *bond-slip* exponenciais, decidiu-se confrontar os resultados obtidos pelo modelo analítico proposto com o modelo numérico proposto por Biscaia et al. [11], o qual assume a fórmula de Popovics [36] para descrever o comportamento local da interface entre o compósito de FRP e o substrato de betão.

O modelo analítico proposto é ainda comparado com os estudos experimentais de Biscaia et al. [10]. Na Figura 5.41 os resultados experimentais retirados de [10] e os resultados numéricos do trabalho de Biscaia et al. [11] são comparados com o modelo analítico proposto no presente estudo. Os parâmetros utilizados foram os definidos em [10]: $t_p = 2.54$ mm, $b_p = 80$ mm, $E_p = 20.39$ GPa, $\tau_{\max} = 4.24$ MPa, $s_{\max} = 0.101$ mm e $s_{ult} = 0.720$ mm. O betão usado é da classe C30/37 de resistência com uma tensão média de $f_{cm} = 2.69$ MPa.

Através da análise da Figura 5.41, observa-se que as duas propostas, analítica e numérica [11], são bastante próximas. As diferenças encontradas nestas duas propostas são justificadas pela limitação do deslizamento último no modelo *bond-slip*, ou seja, no caso numérico de Biscaia et al. [11] foi definido que o início do descolamento ocorreria para $s_{ult} = 0,720$ mm, enquanto no modelo analítico não foram impostas quaisquer limitações de deslizamento. Estas duas diferentes opções levam a respostas pós-colapso diferentes, isto é, quando não é imposto um s_{ult} a resposta apresenta um fenómeno de *snap-back* onde os deslizamentos tendem para infinito após terem diminuído, enquanto ao fixar-se o s_{ult} o deslizamento da interface tende para o valor de s_{ult} .

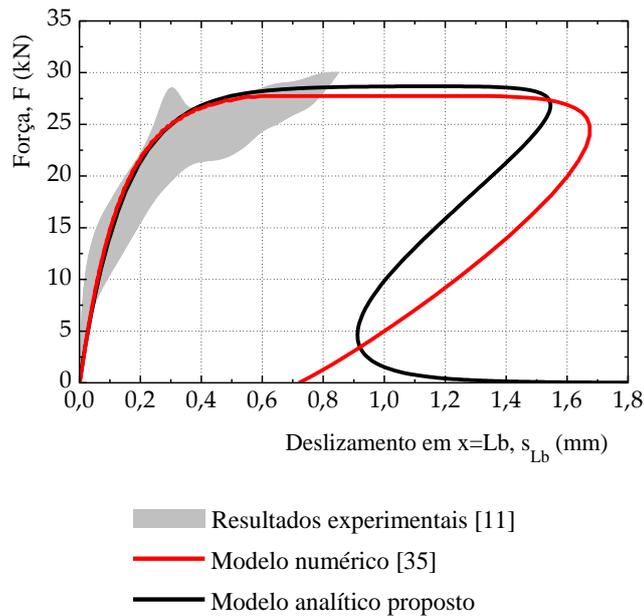


Figura 5.41 – Comparação do modelo analítico proposto com o modelo numérico [11] e com os resultados experimentais [10]. Adaptado de [37].

Quando não é imposta uma limitação do s_{ult} , como no caso do modelo analítico do presente estudo, existe uma maior dificuldade em definir a força máxima transmitida ao compósito, uma vez que o patamar a que está associada a força máxima apresenta uma ligeira inclinação.

Experimentalmente, é muito difícil observar o comportamento de pós-colapso da interface entre o compósito de FRP e o substrato. Normalmente, os resultados experimentais permitem apenas obter a resposta da interface até a força máxima ser atingida, já que os modos de rotura ocorrem de forma brusca.

Através da Figura 5.41, observa-se ainda que o modelo analítico está em concordância com os resultados experimentais obtidos em [10].

Capítulo 6 - Conclusões e desenvolvimentos futuros

6.1. Aspectos gerais

No presente capítulo são sintetizadas as conclusões mais relevantes que podem ser retiradas do presente trabalho obtidas através da componente experimental e do modelo analítico proposto. Apresentam-se ainda possíveis desenvolvimentos futuros com o objetivo de aumentar o conhecimento acerca do sistema de reforço com compósitos de FRP.

6.2. Conclusões

No presente trabalho realizaram-se ensaios de corte simples em blocos de betão armado reforçados com compósitos de CFRP para se perceber a influência do comprimento colado e da técnica de colagem dos compósitos de CFRP na ligação do CFRP/betão.

O modelo analítico proposto permite prever com rigor o fenómeno completo do descolamento da interface entre o compósito de FRP e o substrato. Este modelo permite prever o pós-colapso da interface FRP/betão e identificar um fenómeno *snap-back* conforme descrito na literatura. Este modelo é válido para qualquer comprimento colado de compósito de FRP e pode ser aplicado tanto para a técnica EBR como para a técnica NSM, alterando-se apenas o parâmetro D , definido pelas equações (5.10), (5.22) e (5.23).

O modelo não linear proposto conduz a expressões analíticas que poderão ser úteis a implementar em códigos ou normas de dimensionamento de ligações aderentes CFRP/betão.

A partir dos ensaios experimentais e do modelo analítico, concluiu-se que, em qualquer uma das duas técnicas de colagem estudadas, a força transmitida ao compósito de CFRP aumenta com o comprimento de colagem. No entanto, a resistência da ligação deixa de aumentar a partir de um

certo comprimento colado, o qual se identifica como comprimento efetivo da ligação. Com base nos ensaios experimentais e no modelo analítico proposto, concluiu-se que, para a técnica EBR, o comprimento efetivo da ligação está entre 150 e 185 mm, enquanto para a técnica NSM está entre 100 e 125 mm. Concluiu-se, assim, que o comprimento efetivo da ligação pela técnica NSM é inferior ao da técnica EBR, isto é, o comprimento efetivo da técnica NSM é cerca de 67% do da técnica EBR.

Dos resultados do presente estudo, concluiu-se que se conseguem impor forças muito superiores nas amostras reforçadas pela técnica NSM, cerca do dobro da força imposta às amostras reforçadas pela técnica EBR.

Em grande parte dos ensaios experimentais realizados neste trabalho, o modelo analítico proposto conseguiu prever o comportamento da interface entre o compósito de CFRP e o substrato de betão. Por exemplo, em termos de força máxima, os erros máximos entre os resultados analíticos e os experimentais foram de 25,9% para a técnica EBR e de 37,9% para a técnica NSM. Estes erros podem dever-se, em parte, a imprecisões nos métodos de medição experimental, na preparação das amostras e na execução dos ensaios.

Para as amostras reforçadas com compósitos de CFRP pela técnica EBR, em mais de 50% dos ensaios a rotura ocorreu pelo substrato de betão, ficando uma camada de betão agarrada ao compósito de CFRP. Além da rotura pelo betão, observaram-se outros dois tipos de rotura: rotura adesiva na interface entre o compósito de CFRP e o adesivo; e rotura mista com parte da rotura pelo betão e outra parte pela interface FRP/adesivo.

Excetuando os ensaios com roturas condicionadas pelo dispositivo de amarração mecânica do CFRP, os ensaios realizados pela técnica NSM tiveram roturas pelo substrato de betão, ficando uma camada de betão agarrada ao compósito de CFRP em ambos os lados.

Verificou-se também que na técnica NSM os deslizamentos últimos são normalmente superiores aos da técnica EBR, o que leva a concluir que a técnica NSM apresenta um aumento na sua capacidade de deformação no momento da rotura quando comparado com o sistema EBR, proporcionando roturas mais dúcteis.

As curvas *bond-slip* analíticas admitidas para as técnicas EBR e NSM deviam ser parecidas. No entanto, apresentaram algumas diferenças que podem ser justificadas pela diferença da espessura da resina usada (espessura da resina $t_r=1,4$ mm no caso da técnica EBR e $t_r=1,8$ mm no caso da técnica NSM). Por outro lado, a falta de resolução das fotografias obtidas nos ensaios e usadas na Correlação de Imagem Digital, poderão justificar também as diferenças encontradas em ambas as curvas *bond-slip* médias.

Concluiu-se que as forças transmitidas ao betão são nulas na extremidade carregada, em $x=L_b$, e são máximas na extremidade livre, em $x=0$. Na extremidade livre, as forças no betão aumentam com o aumento da força transmitida ao compósito de CFRP. Concluiu-se também que, para comprimentos de colagem superiores ao comprimento efetivo da ligação, a força máxima transmitida ao betão junto da extremidade livre atinge o valor da força máxima transmitida ao compósito de CFRP na extremidade carregada. Isto acontece porque o comprimento colado é superior ao comprimento efetivo e, por isso, a extensão é nula junto da extremidade livre.

O modelo analítico proposto foi comparado com o modelo analítico de Ueda e Dai [20]. Os dois modelos produzem respostas idênticas até se atingir a força máxima transmitida ao compósito. No entanto, ao contrário do modelo analítico proposto no presente estudo, o modelo de Ueda e Dai [20] não consegue prever o comportamento do sistema de reforço na fase de pós-colapso. Além disso, a utilização do modelo de Ueda e Dai [20] está restrita aos casos em que o comprimento colado é superior ao comprimento efetivo da ligação.

O modelo proposto foi ainda comparado com um modelo numérico de Biscaia et al. [11] e com resultados experimentais de Biscaia et al. [10] encontrados na literatura. Observou-se que o modelo proposto está em concordância tanto com os resultados experimentais de [10] como com os numéricos de [11].

6.3. Desenvolvimentos futuros

Ao longo da realização deste trabalho, foram surgindo questões e ideias pertinentes com o objetivo de alargar o conhecimento sobre a eficiência da ligação entre o compósito de FRP e o substrato de betão. Neste subcapítulo apresentam-se possíveis desenvolvimentos futuros em trabalhos de investigação que permitiriam responder àquelas questões e ideias que se foram levantando durante a realização desta dissertação.

Observou-se que, no presente estudo, nos ensaios realizados pela técnica NSM as roturas nem sempre ocorreram como esperado, isto é, em alguns casos a rotura ficou condicionada pelo dispositivo de amarração mecânica do CFRP. Por conseguinte, seria interessante realizar mais ensaios para esta técnica.

Seria interessante realizar ensaios pela técnica NSM para varões circulares de compósito de CFRP, com diferentes níveis de rugosidade, com o intuito de perceber para que tipo de comercialização de compósitos de FRP a técnica NSM é mais eficiente.

Seria também interessante realizar ensaios de corte simples para a técnica EBR para diferentes tipos de preparação de superfície de betão, de forma a perceber qual a técnica que promove maior eficiência da ligação CFRP/betão.

Poderia também ser interessante variar o tipo e a espessura do adesivo, com o propósito de entender a sua influência no comportamento da ligação entre o compósito de CFRP e o substrato de betão.

Propõe-se a realização de ensaios de corte simples para as técnicas EBR e NSM para diferentes classes de betão, de forma a perceber a sua influência no sucesso da técnica de reforço por colagem de compósitos de FRP.

Pode ser interessante analisar o campo de tensões no betão, uma vez que pode conduzir a análises mais simplificadas do que aquelas agora propostas e que facilitarão a sua utilização por parte de projetistas.

Seria igualmente interessante perceber a influência das armaduras de aço no desempenho da ligação CFRP/betão. Por exemplo, no caso da técnica NSM, a profundidade assumida na realização dos rasgos no betão e a conseqüente aproximação às armaduras poderá ser motivo interessante de análise mais detalhada.

Sugere-se também a realização de ensaios de corte simples com ancoragem mecânica junto da extremidade livre do compósito de FRP, com o intuito de se aproveitar melhor as propriedades do compósito de FRP, melhorando a ligação do compósito de FRP ao substrato de betão.

Bibliografia

- [1] ACI Committee 440: “*Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*”. American Concrete Institute, ACI 440.2R-02, 2002.
- [2] Almeida, G., Biscaia, H., Melicio F. e Chastre C.: “*In-Plane Displacement and Strain Image Analysis*”. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2015.
- [3] Almeida, M.: “*Image Processing for Displacement Measurements*”. Tese de Doutoramento, Universidade Nova de Lisboa, 2015.
- [4] ASTM-D3039/D3039M.: “*Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*”. Annual Book of ASTM Standards, 1995.
- [5] Au, C. e Büyüköztürk, O.: “*Peel and Shear Fracture Characterization of Debonding in FRP Planted Concrete Affected by Moisture*”. Journal of Composites for Construction, 2005; 10(1): 35-47.
- [6] Barros, J.: “*Materiais Compósitos no Reforço de Estruturas*”. Universidade do Minho, Jornadas de Engenharia civil, 2004.
- [7] Bilotta, A, Ceroni, F, Di Ludovico, M, Nigro, E, Pecce, M e Manfredi, G.: “*Bond Efficiency of EBR and NSM FRP Systems Strengthening Concrete Members*”. Journal of Composites for Construction, 2011; 15(5):757-772.
- [8] Biscaia, H.: “*Comportamento e modelação da ligação GFRP/Betão em elementos de betão armado expostos a ambientes agressivos*”. Tese de Doutoramento, Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- [9] Biscaia, HC, Chastre, C e Silva, MAG.: “*Linear and nonlinear analysis of bond-slip models for interfaces between FRP composites and concrete*”. Composites Part B: Engineering, 2013;45(1):1554-1568.
- [10] Biscaia, HC, Chastre, C e Silva, MAG.: “*Nonlinear numerical analysis of the debonding failure process of FRP-to-concrete interfaces*”. Composites Part B: Engineering, 2013; 50:210-223.
- [11] Biscaia, HC, Chastre, C e Viegas, A.: “*A new discrete method to model FRP-to-parent material bonded joints*”. Composite Structures, 2015; 121:280-295.
- [12] Blaschko, M.: “*Bond behaviour of CFRP strips glued into slits*”. Proceedings FRPRCS-6. Singapore: World Scientific; 2003. p. 205–214.
- [13] Caggiano, A, Martinelli, E e Faella, C.: “*A fully-analytical approach for modelling the response of FRP plates bonded to a brittle substrate*”. International Journal of Solids and Structures, 2012; 49:2291-2300.
- [14] Carrara, P, Ferretti, D, Freddi, F e Rosati, G.: “*Shear tests of carbon fiber plates bonded to concrete with control of snap-back*”. Engineering Fracture Mechanics, 2011; 78:2663-2678
- [15] Carvalho, T.: “*Reforço à flexão de vigas de betão armado com compósitos de CFRP*”. Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2010.

- [16] Chajes, MJ, Finch, WW, Januska, TF e Thomson, TA.: “*Bond and force transfer of composite material plates bonded to concrete*”. Structural Journal, 1996; 93:209-217.
- [17] Chen, JF e Teng, JG.: “*Anchorage strength models for FRP and steel plates bonded to concrete*”. Journal of Structural Engineering, 2001; 127(7):784-791.
- [18] Cornetti, P e Carpinteri, A.: “*Modelling the FRP-concrete delamination by means of an exponential softening law*”. 2011; 33(6):1988-2001.
- [19] Dai, J, Ueda, T e Sato, Y.: “*Development of the nonlinear bond stress-slip model of fiber reinforced plastics sheet-concrete interfaces with a simple method*”. Journal of Composites for Construction, 2005;9(1):52-62.
- [20] Dai, J, Ueda, T e Sato, Y.: “*Unified Analytical Approaches for Determining Shear Bond Characteristics of FRP-Concrete Interfaces through Pullout Tests*”. Journal of Advanced Concrete Technology, 2006; 4(1):133-145.
- [21] De Lorenzis, L e Nanni, A.: “*Bond between Near Surface Mounted FRP rods and concrete in structural strengthening*”. ACI Structures Journal, 2002; 99(2):123-133.
- [22] De Lorenzis, L e Teng, JG.: “*Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures*”. Composites Part B: Engineering, 2007; 38(2):119-143.
- [23] Delaney J, Karbhari V.: “*Defect criticality in FRP strengthening*”. 8th International Symposium on fiber reinforced polymers for concrete structures (FRPRCS-8), University of Patras, 2007; 3-20.
- [24] Dimande A.: “*Influência da interface no reforço à flexão de estruturas de betão com sistemas de FRP*”. Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal; 2003.
- [25] El-Hacha, R e Rizkalla, S.: “*Near-Surface-Mounted Fiber-Reinforced Polymer Reinforcements for Flexural Strengthening of Concrete Structures*”. ACI Structural Journal, 2004; 101(5):717-726.
- [26] Eurocode 2 (EC2): “*Eurocode 2: design of concrete structures – part 1-1: general rules ad rules for buildings*”. EN 1992-1-1; December 2004.
- [27] Ferracuti, B, Savoia, M and Mazzotti, C.: “*A numerical model for FRP-concrete delamination*”. Composites Part B: Engineering, 2006; 37:356-364.
- [28] Ferracuti, B.: “*Strengthening of RC structures by FRP: Experimental analyses and numerical modeling*”. Tese de Doutoramento, Università degli Studi di Bologna, Italy, 2006.
- [29] Fib-Bulletin 14: “*Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures*”, 2001.
- [30] HB 305-2008: “*Design handbook for RC structures retrofitted with FRP and metal plates: beams and slabs*”. Sydney, 2008.
- [31] Hosseini, A e Mostofinejad, D.: “*Effective bond length of FRP-to-concrete adhesively-bonded joints: Experimental evaluation of existing models*”. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014; 48:150-158.
- [32] Iovinella, I, Prota, A e Mazzotti, C.: “*Influence of surface roughness on the bond of FRP laminates to concrete*”. Construction and Building Materials, 2013; 40:533-542.
- [33] Macedo, LS, Costa, IG e Barros, JAO.: “*Assessment of the influence of the adhesive properties and geometry of CFRP laminates in the bond behavior*”. Betão Estrutural, Guimarães, Portugal, 2008.
- [34] Mazzotti, C, Savoia, M e Ferracuti, B.: “*An experimental study on delamination of FRP plates bonded to concrete*”. Construction and Building Materials, 2008; 22:1409-1421.
- [35] Parretti, R e Nanni, A.: “*Strengthening of RC Members Using Near-Surface Mounted FRP Composites: design overview*”. Advances in Structural Engineering, 2004; 7(5):469-483.
- [36] Popovics S.: “*A numerical approach to the complete concrete stress-strain relation for concrete*”. Cement Concrete Research, 1973;3(5):583-599.
- [37] Relatório interno: Biscaia, H., Borba, I., Silva, C. e Chastre, C.: “*Nonlinear theoretical model to predict the full-range debonding process of FRP-to-parent material interfaces*”. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2015.
- [38] S&P Laminates CFK: “*Prefabricated carbon fibre plates*”. Technical Data Sheet, 2012.

- [39] S&P Resin 220 epoxy adhesive: “*Two-component epoxy resin-based adhesive for S&P FRP Systems*”. Technical Data Sheet, 2013.
- [40] Sena-Cruz, JM e Barros, JAO.: “*Bond between Near-Surface Mounted Carbon-Fiber-Reinforced Polymer laminate strips and concrete*”. Journal of Composites for Construction, 2004; 8(6):519-527.
- [41] Sena-Cruz, JM, Barros, JAO, Coelho, MR e Silva, L.: “*Efficiency of different techniques in flexural strengthening of RC beams under monotonic and fatigue loading*.” Construction & Building Materials, 2011; 29:175-182.
- [42] Seo, SY, Feo, L e Hui, D.: “*Bond strength of near surface-mounted FRP plate for retrofit of concrete structures*”. Composite Structures, 2013; 95:719-727.
- [43] Seracino, R, Raizal Saifulnaz, MR e Ohlers, DJ.: “*Generic debonding resistance of EB and NSM plate-to-concrete joints*”. Journal of Composites for Construction, 2007; 11(1):62–70.
- [44] Teng, JG; Yuan, H e Chen, JF.: “*FRP-to-concrete interfaces between two adjacent cracks: Theoretical model for debonding failure*”. International Journal of Solids and Structures, 2006; 43:5750-5778.
- [45] Ueda, T e Dai, J.: “*Interface bond between FRP sheets and concrete substrates: properties, numerical modeling and roles in member behavior*”. Progress in Structural Engineering and Materials, 2005; 7(1):27-43.
- [46] White, D. e Take, W.: “*GeoPIV: Particle Image Velocimetry (PIV) software for use in geotechnical testing*”. Cambridge University Engineering Department Technical Report. D-SOILS-TR322; 2002.
- [47] Yao, J, Teng, JG e Chen, JF.: “*Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints*”. Composites Part B: Engineering, 2005; 36:99-113.
- [48] Yuan, H, Teng, JG, Seracino, Wu, ZS e Yao, J.: “*Full-range behaviour of FRP-to-concrete bonded joints*”. Engineering Structures, 2004; 26(5):553-565.