



José Ricardo Loureiro Cruz

Influência do tipo de adesivo no comportamento de elementos de betão reforçados com laminados de CFRP de acordo com a técnica NSM

Universidade do Minho
Escola de Engenharia





Universidade do Minho
Escola de Engenharia

José Ricardo Loureiro Cruz

Influência do tipo de adesivo no
comportamento de elementos de betão
reforçados com laminados de CFRP de acordo
com a técnica NSM

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

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

janeiro de 2016

AGRADECIMENTOS

Nesta secção agradeço a todas as pessoas e entidades que contribuíram para a realização deste trabalho, pois sem eles nada disto seria possível.

Este trabalho foi realizado sob orientação científica do Prof. José Sena Cruz, a quem quero expressar o meu profundo agradecimento por toda a disponibilidade, apoio, empenho e dedicação demonstrados durante este percurso. Um muito obrigado por tudo.

Ao Prof. Eduardo Pereira quero agradecer pela disponibilidade demonstrada na realização dos ensaios com a metodologia DIC.

À Anja Borojevic, que me acompanhou durante a realização do programa experimental, agradeço por todo o companheirismo e colaboração.

Aos alunos de doutoramento Pedro Fernandes, Luís Correia, Mário Coelho e Patrícia Silva e ao investigador Gonçalo Escusa quero manifestar o meu agradecimento por todo o conhecimento transmitido durante esta etapa. Quero também agradecer ao Bahman Ghiassi pelo apoio laboratorial prestado durante os trabalhos.

Aos técnicos do Laboratório de Estruturas (LEST), da Universidade do Minho, António Matos e Marco Peixoto agradeço pelo apoio prestado na execução dos trabalhos experimentais.

Quero também expressar o meu reconhecimento às empresas S&P - Clever Reinforcement Ibérica Materiais de Construção, Lda., Tecnipor - Gomes & Taveira Lda., Artecater - Indústria De Transformação De Granitos, Lda., e Sika Portugal - Produtos Construção E Indústria, S.A. pelo suporte para o desenvolvimento do programa experimental.

Aos meus amigos, que me acompanharam não só nesta etapa, mas ao longo de todo este percurso, quero agradecer toda a amizade e companheirismo.

À Sara, que sempre me compreendeu e apoiou durante este percurso, não poderia deixar de prestar o meu reconhecimento.

À minha família, quem sempre me incentivou ao longo de todos estes anos, quero expressar os meus mais profundos agradecimentos.

RESUMO

Atualmente, o reforço de estruturas de betão armado é cada vez mais uma forma sustentável de preservar o edificado existente. A técnica de reforço que recorre à inserção de laminados de CFRP no betão de recobrimento, vulgarmente designada por *Near Surface Mounted* (NSM) na literatura inglesa, tem vindo a ser cada vez mais utilizada, devido às diversas vantagens que apresenta quando comparada com a técnica baseada na colagem externa destes materiais de reforço. Estudos em vários aspetos relacionados com a técnica NSM têm vindo a ser realizados; no entanto raros são os que procuraram avaliar a influência do tipo de adesivo na resposta de sistemas NSM-CFRP. Assim, considera-se como premente realizar estudos nesta área. É neste contexto que a presente dissertação se insere, procurando avaliar a influência do tipo de adesivo no comportamento de elementos de betão reforçados com laminados de CFRP de acordo com a técnica NSM. O trabalho é composto por uma parte experimental e por uma parte analítico-numérica.

Uma primeira parte do programa experimental inclui ensaios de arranque direto com o objetivo de estudar o comportamento da ligação do sistema NSM-CFRP. Foram consideradas as seguintes variáveis de estudo: (i) o tipo de adesivo; (ii) a secção transversal do laminado; e, (iii) o comprimento de ancoragem. A segunda parte do programa experimental contempla ensaios de flexão em faixas de laje reforçadas com sistemas NSM-CFRP, com o objetivo de avaliar a influência do tipo de adesivo na resposta estrutural. Neste caso foram consideradas como variáveis de estudo: (i) o tipo de adesivo; e, (ii) a existência ou não de pré-fissuração.

Tendo por base os resultados dos ensaios de aderência, foi realizado um estudo analítico-numérico com recurso a um *software* existente, de forma a obter as respetivas leis locais analíticas da tensão de corte *versus* deslizamento.

Em termos gerais, dois dos três adesivos estudados, com características mecânicas similares, revelaram elevados níveis de eficácia no sistema de reforço. No que respeita ao terceiro adesivo, cujo módulo de elasticidade é significativamente inferior aos restantes dois, conduziu a níveis de eficácia no sistema de reforço menos promissores. A pré-fendilhação das faixas de laje não teve influência significativa na resposta global das faixas de laje.

Palavras-chave: NSM, adesivos, aderência, reforço à flexão, simulações.

ABSTRACT

Nowadays, the strengthening of reinforced concrete structures is used as sustainable way of preserving existing buildings. The strengthening technique which uses the insertion of CFRP laminates on the concrete cover, commonly known as Near Surface Mounted (NSM), has been used due to the several advantages, when compared with the technique based on external bonding of these reinforcing materials. Several studies have been performed to assess many aspects of the NSM technique; however there are very few studies that have tried to assess the influence of the adhesive type in the response of NSM-CFRP systems. Thus, it is considered as an important issue to conduct studies in this filed. In this context, the present dissertation aims to contribute for the assessment of the influence of the adhesive type on the behaviour of concrete elements strengthened with CFRP laminates according to the NSM technique. The work includes an experimental component and an analytical-numerical component.

The first part of the experimental program includes direct pullout tests in order to study the bond behaviour of the of NSM-CFRP system. The following variables were considered in present study: (i) the type of adhesive, (ii) the cross section of the laminate; and (iii) the bond length. The second part of the experimental program includes flexural tests in reinforced concrete slab strips with NSM-CFRP systems, in order to evaluate the influence of adhesive type on the structural response. In this case it was considered the following variables: (i) the type of adhesive; and (ii) the existence of pre-cracking.

Based on the results obtained in the pullout tests, an analytical-numerical study was conducted using an existing software, to obtain the corresponding local bond stress *versus* slip law.

In general, two of the three studied adhesives with similar mechanical characteristics, showed high levels of effectiveness. With regard to the third adhesive whose elastic modulus is significantly lower than the other two, yielded to less effectiveness levels. The pre-cracking of slab strips had no significant influence on the corresponding overall response.

Keywords: NSM, different adhesives, bond, flexural strengthening, simulations.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
ÍNDICE.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABELAS	xvii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento do tema	1
1.1.1 Reabilitação estrutural	1
1.1.2 Reabilitação com FRP: técnica EBR <i>versus</i> técnica NSM.....	2
1.2 Técnica NSM: breve resenha.....	4
1.2.1 Aderência do sistema.....	7
1.2.2 Comportamento à flexão	16
1.2.3 Estudos com diferentes adesivos	18
1.3 Objetivos.....	21
1.4 Estrutura da dissertação	22
2 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	25
2.1 Introdução	25
2.2 Ensaios de arranque direto	26
2.2.1 Programa de ensaios	26
2.2.2 Geometrias e configurações de ensaio	27
2.3 Ensaios de flexão em faixas de laje	30
2.3.1 Programa de ensaios	30
2.3.2 Geometria e configuração do ensaio	31
2.4 Caracterização dos materiais	34
2.4.1 Betão.....	34
2.4.2 Varões de aço	36
2.4.3 Laminado de CFRP	37
2.4.4 Adesivos	38
2.5 Confeção e reforço dos provetes.....	39
2.5.1 Betonagem e abertura de entalhes	39
2.5.2 Aplicação do reforço	41

2.5.3	Pré-fendilhação das faixas de laje.....	44
3	ENSAIOS DE ARRANQUE DIRETO: RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
3.1	Resumo dos principais resultados obtidos	49
3.1.1	Adesivo 1	50
3.1.2	Adesivo 2	52
3.1.3	Adesivo 3	53
3.2	Evolução da força de arranque e dos deslizamentos	55
3.3	Modos de rotura	58
3.4	Análise das variáveis de estudo.....	60
3.4.1	Força de arranque máxima.....	60
3.4.2	Deslizamento na extremidade carregada para a força de arranque máxima.....	61
3.4.3	Tensão tangencial média para a máxima força de arranque	62
3.4.4	Eficácia do sistema de reforço	63
3.5	Ensaio realizados com DIC	64
3.5.1	Resultados obtidos	64
3.5.2	Análise dos resultados obtidos.....	70
3.5.3	Análise comparativa.....	73
3.6	Conclusões	75
4	ENSAIOS DE FLEXÃO EM FAIXAS DE LAJE: RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO	77
4.1	Resumo dos principais resultados obtidos	77
4.2	Curvas força <i>versus</i> deslocamento a meio vão.....	78
4.3	Modos de rotura	80
4.4	Largura de fendas, padrão de fendilhação e distância entre fendas.	82
4.5	Extensões nos materiais constituintes das faixas de laje.....	88
4.5.1	Laminado de CFRP.....	88
4.5.2	Aço tracionado.....	90
4.5.3	Betão comprimido.....	91
4.6	Influência do tipo de adesivo e da pré-fendilhação no comportamento à flexão das faixas de laje	92
4.6.1	Carga de fendilhação, cedência das armaduras e máxima.....	92
4.6.2	Ductilidade e resposta pós-pico	97
4.7	Conclusões	99

5	SIMULAÇÕES – ANÁLISE NUMÉRICA	101
5.1	Modelo analítico para a lei local tensão de corte <i>versus</i> deslizamento	102
5.1.1	Equação diferencial regente do fenómeno da aderência	102
5.1.2	Relação entre a força de arranque e o deslizamento.....	102
5.1.3	Expressões analíticas para a relação tensão de corte <i>versus</i> deslizamento	103
5.2	Resultados obtidos nas simulações	104
5.3	DIC <i>versus</i> simulações numéricas	110
6	CONCLUSÕES	115
6.1	Considerações finais	115
6.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	117
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119
	ANEXO I – Resultados dos ensaios de arranque direto.....	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Técnica de reforço NSM utilizada para aumentar a capacidade resistente à flexão.	4
Figura 1.2 – Ensaio de aderência com provete com configuração em “C”: (a) foto do ensaio; (b) esquema do ensaio (De Lorenzis <i>et al.</i> , 2002).	9
Figura 1.3 – Ensaio de aderência com provetes cúbicos: (a) esquema de ensaio; (b) foto do ensaio (Fernandes <i>et al.</i> , 2012).	10
Figura 1.4 – Ensaio de aderência com provetes prismáticos: (a) foto do provete; (b) esquema do ensaio (Khshain <i>et al.</i> , 2015).	11
Figura 1.5 – Geometria e configuração de ensaio dos ensaios de arranque em flexão: (a) configuração em “T” invertido recorrendo apenas a um bloco único (De Lorenzis, 2002); (b) configuração retangular recorrendo a dois blocos de betão (Sena-Cruz, 2005).	12
Figura 1.6 – Formas de rotura possíveis associadas à rotura na ligação (Coelho <i>et al.</i> , 2015).	13
Figura 1.7 – Resumo dos modos de rotura observados nos ensaios DPT da base de dados do estudo de (Coelho <i>et al.</i> , 2015).	14
Figura 1.8 – Informações gerais sobre os modelos ensaiados (Dias <i>et al.</i> , 2004).	17
Figura 1.9 – Geometria das faixas de laje e configuração do ensaio (Mostakhdemin Hosseini <i>et al.</i> , 2014).	18
Figura 1.10 – Fotografias de configuração de ensaio usado por (Macedo <i>et al.</i> , 2008).	19
Figura 1.11 – Testes de aderência em substratos de alvenaria: (a) <i>pull-off test</i> ; (b) <i>single-lap test</i> (Kwiecień, 2012).	21
Figura 2.1 – Geometria e configuração de ensaio de arranque direto para o caso dos provetes cúbicos: (a) geometria e configuração de ensaio; (b) detalhe do reforço; (c) foto do ensaio.	28
Figura 2.2 – Geometria e configuração de ensaio de arranque direto para o caso dos provetes prismáticos: (a) geometria e configuração de ensaio; (b) detalhe do reforço; (c) foto do ensaio.	29
Figura 2.3 – Faixas de laje: (a) geometria da secção transversal e detalhe do reforço; (b) geometria longitudinal e posição dos extensómetros.	33
Figura 2.4 – Força vs. extensão para os varões de aço ensaiados: (a) diâmetro de 6 mm; (b) diâmetro de 8 mm.	36

Figura 2.5 – Preparação dos provetes de betão: (a) produção das armaduras para as faixas de laje; (b) aplicação de extensómetros nas armaduras; (c) preparação das cofragens; (d) betonagem; (e) provetes após a descofragem; (f) abertura dos entalhes de reforço.	40
Figura 2.6 – Trabalhos preparatórios (antes da aplicação do reforço): (a) limpeza dos entalhes com ar comprimido; (b) isolamento das zonas próximas ao entalhe; (c) chapas metálicas; (d) aplicação de delimitadores do comprimento de ancoragem; (e) extensómetro já colocado no laminado.	42
Figura 2.7 – Execução do reforço: (a) aplicação do primário (adesivo3); (b) pesagem dos componentes A e B; (c) mistura dos dois componentes do adesivo; (d) aplicação do adesivo com espátula (adesivos 1 e 2). (e) aplicação do adesivo 3; (f) regularização da superfície do reforço com a espátula.....	43
Figura 2.8 – Trabalhos preparatórios (antes do ensaio): (a) provete após pintura; (b) trecho de laminado para fixação do batente do LVDT.....	44
Figura 2.9 – Pré-fendilhação das faixas de laje: (a) força vs. deslocamento a meio vão; (b) força vs. extensão no aço a meio vão.	45
Figura 2.10 – Numeração adotada para as fendas resultantes da pré-fendilhação.....	46
Figura 2.11 – Medição da largura de fenda: (a) fenda VII da faixa de laje SL_ADH1_C; (b) fenda IX da faixa de laje SL_ADH3_C.	46
Figura 2.12 – Largura média das fendas resultantes da pré-fendilhação: (a) SL_ADH1_C; (b) SL_ADH2_C; (c) SL_ADH3_C.....	47
Figura 3.1 – Força de arranque vs. deslizamento na extremidade carregada (adesivo 1): (a) laminado L10 e (b) laminado L20.....	52
Figura 3.2 – Força de arranque vs. deslizamento na extremidade carregada com o adesivo 2 e laminado L20.	53
Figura 3.3 – Força de arranque vs. deslizamento na extremidade carregada (adesivo 3): (a) laminado L10 e (b) laminado L20.....	54
Figura 3.4 – Evolução do deslizamento nas extremidades carregada e livre e força de arranque nos provetes ADH2_L20_Lb200_2 (a) e ADH2_L20_Lb300_3.	56
Figura 3.5 – Esquema genérico da possível distribuição das tensões de corte ao longo do comprimento de aderência durante o ensaio.	57
Figura 3.6 – Modos de rotura: (a) deslizamento do laminado de CFRP (adesivos 1 e 2); (b) rotura do laminado de CFRP (adesivos 1 e 2); (c) deslizamento do laminado (adesivo 3); (d) aspeto da interface adesivo/laminado após extração do laminado (adesivo 3).	59

Figura 3.7 – Influência das variáveis de estudo: (a) na força máxima; (b) no deslizamento na extremidade carregada para a força de arranque máxima; (c) na tensão tangencial máxima na interface adesivo/laminado; (d) na razão entre a máxima força e a resistência máxima do laminado.	60
Figura 3.8 – Provete ADH1_L20_Lb200_2: (a) relação <i>Fl versus sl</i> ; (b) a evolução das extensões principais de tração durante o ensaio.	65
Figura 3.9 – Provete ADH2_L20_Lb100_1: (a) relação <i>Fl versus sl</i> ; (b) a evolução das extensões principais de tração durante o ensaio.	66
Figura 3.10 – Provete ADH2_L20_Lb200_1: (a) relação <i>Fl versus sl</i> ; (b) a evolução das extensões principais de tração durante o ensaio.	67
Figura 3.11 – Provete ADH2_L20_Lb300_1: (a) relação <i>Fl versus sl</i> ; (b) a evolução das extensões principais de tração durante o ensaio.	68
Figura 3.12 – Provete ADH3_L20_Lb100_1: (a) relação <i>Fl versus sl</i> ; (b) a evolução das extensões principais de tração durante o ensaio.	69
Figura 3.13 – Comparação dos danos nos materiais entre provetes de diferentes adesivos e iguais comprimentos de ancoragem: (a) ADH1_L20_Lb100 e ADH3_L20_Lb100; (b) ADH1_L20_Lb200 e ADH2_L20_Lb200.	74
Figura 4.1 – Força vs. deslocamento a meio vão para as séries não pré-fendilhada (a) e pré-fendilhada (b).....	79
Figura 4.2 – Modos de rotura: (a) rotura do laminado de CFRP (lajes reforçadas com os adesivos 1 e 2); (b) deslizamento do laminado (lajes reforçadas com o adesivo adesivo 3); (c) desagregação do adesivo na extremidade (lajes reforçadas com o adesivo 3); (d) indícios de deslizamento do laminado entre a secção de meio vão e a extremidade (lajes reforçadas com o adesivo 3).	81
Figura 4.3 – Evolução da largura de fenda para: (a) série não pré-fendilhada; (b) série pré-fendilhada.	83
Figura 4.4 – Padrões de fendilhação obtidos após o ensaio das faixas de laje.	85
Figura 4.5 – Determinação da distância média entre fendas.	86
Figura 4.6 – Distância média entre fendas de cada faixa de laje.	87
Figura 4.7 – Esquema ilustrativo do sentido de tração dos laminados e orientação das fendas de corte observadas no betão circundante ao entalhe.	88
Figura 4.8 – Evolução das extensões nos laminados de CFRP a meio vão nas séries: (a) não pré-fendilhada; (b) pré-fendilhada.	89

Figura 4.9 – Força vs. extensão no aço tracionado a meio vão nas faixas de laje: (a) sem pré-fendilhação; (b) com pré-fendilhação.	91
Figura 4.10 – Força vs. extensão no betão a meio vão: (a) série não pré-fendilhada; (b) série pré-fendilhada.	92
Figura 4.11 – Cargas de fendilhação do betão (a) e plastificação das armaduras (b).	93
Figura 4.12 – Valores máximos: (a) forças aplicadas; (b) extensão máxima no laminado de CFRP.	96
Figura 4.13 – Valores do parâmetro de ductilidade (a) e relação entre a força residual e a força máxima que a faixa de laje é capaz de suportar (b).	97
Figura 5.1 – Entidades envolvidas no modelo numérico (Adaptado de Sena-Cruz (2005)) .	103
Figura 5.2 – Aspeto típico da lei local $\tau - s$: (a) lei utilizada para simulação dos provetes reforçados com os adesivos 1 e 2; (b) lei utilizada para simulação dos provetes reforçados com o adesivo 3.	104
Figura 5.3 – Simulação das séries ADH1_L10_Lb60 (a), ADH1_L10_Lb80 (b) e ADH1_L10_Lb100 (c).	106
Figura 5.4 – Simulação das séries ADH1_L20_Lb80 (a), ADH1_L20_Lb100 (b), ADH1_L20_Lb200 (c) e ADH1_L20_Lb300 (d).	107
Figura 5.5 – Simulação das séries ADH2_L20_Lb80 (a), ADH2_L20_Lb100 (b), ADH2_L20_Lb200 (c) e ADH2_L20_Lb300 (d).	107
Figura 5.6 – Simulação das séries ADH3_L10_Lb50 (a), ADH3_L10_Lb100 (b) e ADH3_L100_Lb150 (c).	108
Figura 5.7 – Simulação das séries ADH3_L20_Lb80 (a), ADH3_L20_Lb100 (b).	108
Figura 5.8 – DIC vs. simulações numéricas para a série ADH1_L20_Lb200.	112
Figura 5.9 – DIC vs. simulações numéricas para a série ADH2_L20_Lb100.	113

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Designação das séries usadas no estudo da aderência.	27
Tabela 2.2 – Designação das faixas de laje usadas no presente programa experimental.	31
Tabela 2.3 – Composição do betão usado.	35
Tabela 2.4 – Características mecânicas à compressão do betão usado.	35
Tabela 2.5 – Características mecânicas dos aços usados no presente programa de ensaios.	37
Tabela 2.6 – Propriedades resistentes dos laminados de CFRP usados no presente programa de ensaios.	37
Tabela 2.7 – Designação definida para os adesivos usados no presente programa de ensaios.	38
Tabela 2.8 – Propriedades mecânicas dos adesivos usados no presente programa de ensaios.	39
Tabela 2.9 – Dimensões médias dos entalhes para introdução do laminado de CFRP.	41
Tabela 3.1 – Valores médios para os principais parâmetros obtidos com o adesivo 1.	51
Tabela 3.2 – Valores médios para os principais parâmetros obtidos com o adesivo 2.	53
Tabela 3.3 – Valores médios para os principais parâmetros obtidos com o adesivo 3.	54
Tabela 3.4 – Dados relativos à fendilhação observada com a metodologia DIC.	70
Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios das faixas de laje.	78
Tabela 5.1 – Valores dos parâmetros que definem a lei $\tau - s$ utilizando o adesivo 1.	108
Tabela 5.2 – Valores dos parâmetros que definem a lei $\tau - s$ utilizando o adesivo 2.	108
Tabela 5.3 – Valores dos parâmetros que definem a lei $\tau - s$ utilizando o adesivo 3.	109

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do tema

As estruturas de betão armado encontram-se um pouco por toda a parte ao serviço da sociedade nas suas mais diversas vertentes tais como em edifícios de habitação, comércio, serviços, infraestruturas para vias de comunicação, entre outros. Estas estruturas são projetadas para um determinado período de vida útil durante o qual devem realizar as suas funções a que se destinam com os níveis adequados de segurança, funcionalidade e durabilidade. No passado, os aspetos relacionados com a manutenção/conservação foram fortemente negligenciados, nomeadamente devido à ausência de conhecimento sobre o tema, o que faz com que atualmente algumas estruturas de betão armado apresentem problemas estruturais graves. Por outro lado, a elevada idade que algumas estruturas apresentam implica também a necessidade de intervenções a fim de evitar a propagação e acumulação dos danos. Surge assim a necessidade eminente de intervenção nesta área, o que se for atempada permitirá poupar tempo e custos traduzindo-se num benefício enorme para a sociedade no futuro.

Atualmente, o sector da reabilitação das construções, que inclui o reforço/reparação das estruturas, apresenta importância crescente um pouco por todo o mundo, sendo que o mercado da reabilitação tem já bastante preponderância na Europa. Em 2013 o mercado da reabilitação e conservação representava um total de 27.5% do mercado da construção a nível europeu (FIEC, 2014).

1.1.1 Reabilitação estrutural

A reabilitação de estruturas visa restituir os níveis adequados de segurança e desempenho a uma dada estrutura a fim de evitar o seu fim prematuro ou a sua incapacidade para desempenhar as funções que lhe foram conferidas. A necessidade de intervenção pode dever-se a vários fatores, nomeadamente a problemas estruturais resultantes de cargas excessivas que tenham atuado sobre a estrutura, exposição a condições ambientais agressivas, erros de projeto e de construção ou ações que não eram previsíveis de vir a atuar, como exemplo um sismo ou uma explosão entre outros. Por outro lado, a reabilitação urbana levará certamente à mudança do uso de muitas estruturas, o que implicará o seu reforço no caso da existência de cargas mais

elevadas para o novo uso. Mais ainda, a alteração dos códigos de projeto poderá implicar edifícios que foram projetados segundo as normas antigas não cumpram as novas normas sendo necessário proceder ao seu reforço.

A reparação/reforço de estruturas pode ser efetuada com recurso a várias técnicas que habitualmente se classificam de tradicionais ou inovadoras. As principais técnicas de reforço tradicionais incluem o encamisamento em betão armado, reforço com chapas de aço, pré-esforço exterior e, por fim, a redução dos vãos implementando novas estruturas de suporte. Mais recentemente apareceram as designadas técnicas inovadoras com recurso aos FRP (*Fiber Reinforced Polymers* na literatura inglesa). Nas aplicações de Engenharia Civil, os FRP mais usados são os polímeros reforçados com fibra de vidro, GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymers* na literatura inglesa) e os polímeros reforçados com fibra de carbono, CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymers* na literatura inglesa), sendo este último alvo de estudo na presente dissertação. Comparativamente com as técnicas tradicionais, as técnicas inovadoras apresentam várias vantagens, nomeadamente a leveza e facilidade de aplicação dos materiais de reforço bem como a o elevado rácio resistência/peso, bom comportamento à fadiga, imunidade à corrosão e grande versatilidade de formas disponíveis no mercado para aplicação. Contudo, estes materiais apresentam custos iniciais um pouco mais elevados, são mais suscetíveis ao ataque pelo fogo e a sua aplicação exige mão-de-obra especializada.

1.1.2 Reabilitação com FRP: técnica EBR *versus* técnica NSM

A utilização de FRP na reabilitação de estruturas de betão armado é maioritariamente realizada com recurso à técnica de colagem externa de laminados ou mantas na superfície dos elementos de betão a reforçar, designada por EBR (*Externally Bonded Reinforcement* na literatura inglesa). Contudo, esta técnica não apresenta elevada eficiência uma vez que as propriedades resistentes do laminado podem não ser completamente exploradas já que a rotura pode ocorrer por descolagem prematura do FRP (Barros *et al.*, 2007; Sena-Cruz *et al.*, 2012).

Mais recentemente surgiu uma nova técnica, NSM (*Near Surface Mounted* na literatura inglesa) que consiste na introdução de laminados de FRP no betão de recobrimento. Esta permite minimizar e eliminar alguns problemas associados à técnica EBR. Assim, são usados entalhes previamente executados nos quais é introduzido o laminado (ou varão) de FRP. Tal como na

técnica EBR, normalmente a fixação do FRP é feita com recurso a adesivos de origem epoxídica.

Na técnica NSM têm sido usadas fundamentalmente barras com três tipos de secção transversal: retangular, quadrada e circular sendo que as duas primeiras secções apresentam mais vantagens do que a secção circular. Quanto aos adesivos utilizados, tal como referido anteriormente, o mais comum tem sido o adesivo epoxídico; no entanto, alguns autores também usaram argamassas de origem cimentícia, apresentando melhores resultados o primeiro (Coelho *et al.*, 2015). Esta técnica não tem sido apenas testada em estruturas de betão, mas também em estruturas de madeira e alvenaria.

Comparativamente com a técnica EBR, a técnica NSM apresenta as seguintes vantagens: (i) exige menor quantidade de trabalho para a sua aplicação, nomeadamente ao nível da preparação da superfície de betão para colagem do FRP (a camada superficial de betão sem agregados não necessita ser removida; as irregularidades da superfície de betão são facilmente acomodadas); (ii) as barras usadas no reforço NSM podem ser mais facilmente ancoradas a membros adjacentes para impedir a descolagem prematura do laminado, facto particularmente importante no reforço à flexão de vigas e pilares com ligações rígidas em que os momentos máximos tipicamente ocorrem nas extremidades do elemento de betão; (iii) no reforço com a técnica NSM é mais fácil aplicar pré-esforço; (iv) as barras usadas na técnica NSM encontram-se no interior do betão de recobrimento e desta forma estão protegidas contra impactos acidentais, danos mecânicos, efeitos do fogo e atos de vandalismo; estes aspetos tornam esta técnica particularmente adequada para o reforço de regiões de momento negativo em vigas e lajes; (v) do ponto de vista estético a estrutura não é alterada. Devido a estas vantagens a técnica NSM apresenta-se mais eficiente do que a EBR, podendo também ser utilizadas as duas em simultâneo desde que a espessura do betão de recobrimento permita a abertura de entalhes adequadas à sua aplicação (De Lorenzis e Teng, 2007). Outro aspeto muito importante prende-se com o facto de a aplicação com a técnica NSM ser menos propensa ao destacamento prematuro do laminado de CFRP, permitindo uma melhor utilização das propriedades resistentes do material de reforço (em alguns casos, o FRP chega mesmo até à rotura) (Coelho *et al.*, 2015).

1.2 Técnica NSM: breve resenha

A técnica NSM constitui um sistema de reforço que permite aumentar a capacidade de carga de elementos de betão que a requeiram. Esta pode ser aplicada recorrendo a diferentes tipos de FRP pré-fabricados. Neste estudo são utilizados laminados de polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP). Tal como referido, na técnica NSM os laminados são introduzidos em entalhes previamente executados no betão de recobrimento. A sigla NSM significa *Near Surface Mounted* na literatura inglesa, o que pode ser traduzido para a língua portuguesa como “aplicado próximo à superfície”, ou seja, a técnica consiste nisso mesmo, aplicação de laminados de CFRP na zona próxima da superfície externa do betão. Os entalhes para introdução dos laminados são executadas com recurso a uma máquina de corte, sendo de seguida limpos (logo que a sua superfície esteja seca). Previamente à introdução do laminado, o entalhe é preenchido com um adesivo epoxídico que proporciona a ligação entre o laminado de CFRP e o betão (ver Figura 1.1). Correntemente, com esta técnica utilizam-se laminados de CFRP com dimensões compreendidas entre 10 e 20 mm de largura e com espessura de 1.4 mm. Quanto às dimensões do entalhe, estas variam sensivelmente entre 15 e 25 mm em profundidade, enquanto em largura tipicamente tomam valores entre 3 e 5 mm.

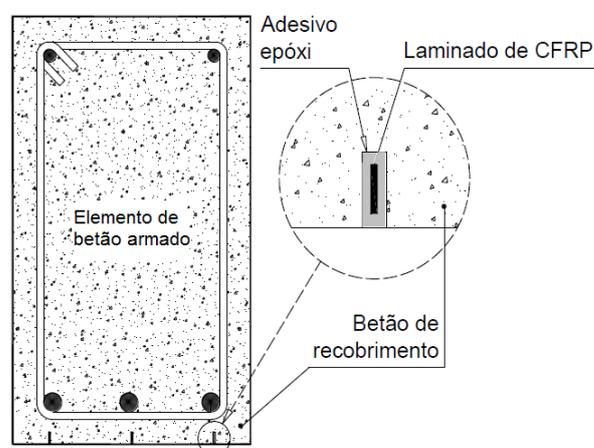


Figura 1.1 – Técnica de reforço NSM utilizada para aumentar a capacidade resistente à flexão.

NSM é uma técnica em que após a abertura do entalhe, o processo de colocação do laminado é relativamente rápido. Por outro lado, a superfície onde o adesivo epoxídico adere não necessita de nenhuma preparação especial. De seguida são apresentados os passos comumente seguidos no processo de reforço adotado com o uso da técnica NSM (para o caso específico de laminados de CFRP):

- i. Abertura dos entalhes no betão de recobrimento usando uma máquina de corte, assegurando quer o controlo das dimensões do entalhe, quer a ausência de danos nas armaduras, caso existam;
- ii. Limpeza dos entalhes com ar comprimido;
- iii. Colocação de elementos auxiliares para o posicionamento do laminado de CFRP no entalhe;
- iv. Limpeza do laminado de CFRP com um solvente adequado (e.g. acetona);
- v. Preparação do adesivo de acordo com as recomendações do fornecedor;
- vi. Enchimento do entalhe e revestimento do laminado de CFRP com o adesivo;
- vii. Inserção do laminado de CFRP no entalhe previamente preenchida com adesivo, pressionando o laminado lentamente para o interior do entalhe, de modo a evitar o aparecimento de vazios;
- viii. A inserção do laminado de CFRP no entalhe provoca o movimento do adesivo para o exterior do entalhe, fluindo entre as paredes laterais do entalhe e o laminado de CFRP. Neste contexto é necessário proceder à regularização da superfície de reforço, removendo o adesivo em excesso.

Após a aplicação do reforço, deverá assegurar-se o tempo de cura do adesivo (que tipicamente consta na ficha técnica deste), durante o qual a estrutura não deverá ser submetida a qualquer tipo de solicitação.

O nível de conhecimento da técnica NSM é bem mais limitado quando comparado com a técnica EBR. Apesar desta constatação, nos últimos anos têm sido realizados diversos estudos sobre o tema nas mais diferentes vertentes. Para uma análise detalhada sobre o estado do conhecimento da técnica NSM recomenda-se a leitura de um trabalho recentemente publicado por Sena-Cruz *et al.* (2015a). Contudo, na presente dissertação inclui-se uma breve resenha dos principais trabalhos desenvolvidos, com especial enfoque nas áreas onde a presente dissertação se insere.

A investigação existente tem incidido principalmente sobre o comportamento estrutural desta técnica, na tentativa de descrever os seus mecanismos resistentes e a sua eficiência nos diferentes campos de aplicação, o que permitirá otimizar os projetos de reforço em que esta venha a ser aplicada. Assim, os estudos realizados em estruturas de betão têm sido direcionados

para as seguintes áreas: (i) o estudo da aderência; (ii) o reforço à flexão e/ou corte; e (iii) o reforço de nós de pórtico. Destes, o reforço à flexão é aquele que mais interesse tem despertado nos investigadores, já que tem sido o aspeto mais estudado no reforço com a técnica NSM (De Lorenzis e Teng, 2007).

Quanto à temática do reforço à flexão, bem como a aderência do sistema NSM-CFRP, uma vez que são objeto de estudo da presente dissertação serão abordadas em secções específicas.

Em termos do reforço ao corte, os estudos têm demonstrado que quer a utilização técnica NSM, quer a aplicação da técnica EBR para reforço ao corte em vigas permitem aumentar a sua capacidade resistente. Comparativamente com a técnica EBR, a técnica NSM é mais eficiente não só em termos de carga última alcançada, mas também em termos de ductilidade. Por outro lado, as vigas reforçadas com a técnica NSM não apresentaram roturas tão frágeis como as reforçadas de acordo com a técnica EBR (Barros e Dias, 2006).

Um outro aspeto importante, cada vez mais atual, prende-se com a durabilidade e o custo do ciclo de vida (conceitos associados à sustentabilidade) da técnica NSM. Da pesquisa efetuada verificou-se que estudos nesta área são escassos. Contudo, na área da durabilidade é possível encontrar alguns estudos, e.g. Garzón-Roca *et al.* (2015), em que os autores realizaram um estudo experimental com vista a avaliar a performance da técnica NSM quando sujeita a efeitos de envelhecimento (ciclos de molhagem-secagem) através de ensaios de arranque direto. Os autores concluíram que os efeitos provocados pelos ciclos de molagem-secagem, de uma forma geral, levam a um decréscimo da capacidade resistente da ligação, sendo esse decréscimo dependente da geometria da ligação.

No contexto do reforço de estruturas de betão, a aplicação de FRP nas infraestruturas rodoviárias (tais como as pontes e viadutos) tem aumentado significativamente de forma a prolongar o tempo de serviço destas estruturas. Este tipo de estruturas estão sujeitas a cargas cíclicas que variam no tempo e em intensidade. Assim, assume particular importância o estudo da performance de estruturas de betão reforçadas segundo a técnica NSM sujeitas à fadiga. Com o propósito de estudar o efeito da fadiga no comportamento da ligação e em flexão nos elementos de betão reforçados segundo a técnica NSM, Fernandes *et al.* (2015) realizaram uma campanha de ensaios experimentais composta por ensaios de arranque direto (DPT) e ensaios

de flexão em faixas de laje. Após os ensaios de fadiga, quer os provetes dos ensaios de arranque direto, quer as faixas de laje foram sujeitos a ensaios até à rotura. Os autores concluíram que o dano acumulado nos ensaios de fadiga praticamente não interfere na capacidade de carga última, sobretudo no caso das faixas de laje. Sena-Cruz *et al.* (2012) realizaram trabalhos com o intuito de avaliar a influência da fadiga no comportamento de vigas reforçadas segundo diferentes técnicas (EBR, MF-EBR e NSM). Assim, neste estudo existiram dois grupos de quatro vigas (uma de referência e uma para cada técnica de reforço) sendo um grupo sujeito apenas a carregamento monotónico e o outro a carregamento cíclico, ao qual se sucede o ensaio à rotura. Neste último grupo, nos ensaios à rotura após o carregamento cíclico, as vigas reforçadas com as técnicas EBR e NSM registaram uma capacidade de carga superior comparativamente com aquelas que apenas foram sujeitas ao carregamento monotónico, ao contrário da viga reforçada com a técnica MF-EBR, a qual sofreu um decréscimo em termos de carga última. Portanto, deste estudo pode concluir-se que a técnica NSM apresentou um bom desempenho quando sujeita a este tipo de carregamento.

Da pesquisa efetuada foi também possível concluir que os efeitos da fluência em estruturas reforçadas utilizando a técnica NSM é um tema ainda pouco estudado requerendo, por isso, estudos dedicados.

1.2.1 Aderência do sistema

A ligação entre o FRP e o betão desempenha um papel fundamental no sucesso do reforço nos sistemas NSM-CFRP. Esta ligação é efetuada por intermédio da aderência (*bond* na literatura inglesa) entre os materiais, e traduz-se na capacidade em se efetuar a transferência de tensões entre o betão e o FRP. Desta forma, é desenvolvida uma ação conjunta compósita dos dois materiais por intermédio de um adesivo durante o processo de carregamento do elemento de betão reforçado. A performance da ligação influencia não só a capacidade de carga última do elemento reforçado, como também o seu comportamento em serviço, nomeadamente a largura e espaçamento de fendas (Sena-Cruz, 2005). Assim, o estudo da aderência de sistemas NSM-CFRP apresenta-se como um ponto fulcral na compreensão desta técnica de reforço. Desta forma, vários investigadores têm vindo a desenvolver estudos sobre esta temática.

O comportamento da ligação está dependente de vários parâmetros, nomeadamente técnicos (Coelho *et al.*, 2015): dimensões do entalhe e do FRP, resistência à tração do betão, propriedades mecânicas do adesivo, secção transversal do FRP e sua textura superficial, bem como a rugosidade da superfície do entalhe onde será colocado o FRP. Dado o elevado número de parâmetros a estudar existe grande necessidade de estudos quer através de caracterizações laboratoriais quer por intermédio de modelações numéricas e analíticas por serem menos dispendiosas (De Lorenzis e Teng, 2007).

Nos parágrafos seguintes são abordados alguns aspetos relativos a estudos que os investigadores têm vindo a realizar nas seguintes áreas: (i) configuração dos ensaios; (ii) modos de rotura observados; (iii) influência do comprimento de ancoragem; (iv) influência de outros parâmetros.

Configurações dos ensaios de arranque

Um dos aspetos críticos para o estudo da ligação com a técnica NSM é a inexistência de uma norma que regulamente a configuração de ensaio a utilizar na caracterização da aderência de sistemas NSM-CFRP (Coelho *et al.*, 2015). Várias configurações têm sido propostas para a realização de ensaios de aderência. As mais comuns são os ensaios de arranque direto (DPT – *Direct Pullout Test* na literatura inglesa) e os ensaios de arranque em flexão (BPT – *Beam Pullout Test* na literatura inglesa). A comunidade científica considera que o BPT tem a capacidade de representar o comportamento à flexão de elementos reforçados segundo a técnica NSM, enquanto que o caso DPT é mais representativo das zonas de extremidade (zona de amarração dos reforços), bem como do caso de reforços intercetando fendas de corte. Para cada um destes tipos de ensaio têm sido apresentadas várias propostas para a geometria do provete a ser utilizado, bem como várias configurações para o ensaio e instrumentação (Coelho *et al.*, 2015)

Nestes ensaios de aderência normalmente são monitorizados a força de arranque e os deslizamentos no final da zona carregada e livre da ligação com recurso a equipamentos de medição tradicionalmente usados, nomeadamente transdutores de deslocamento e células de carga. Podem também ser usados extensómetros de modo a registar as extensões ao longo da zona de embebimento do laminado. No entanto, esta medição pode ter desvantagens

nomeadamente na perturbação e alteração da resposta do sistema dada a sua presença na interface entre os materiais constituintes da ligação.

De seguida são apresentadas algumas configurações de ensaio, assim como alguns aspetos relevantes para cada uma delas.

- **Ensaio de arranque direto (DPT)**

Os ensaios de arranque direto têm sido amplamente utilizados pela comunidade científica para caracterizar a aderência na ligação do FRP ao betão. De Lorenzis *et al.* (2002) propôs a configuração em “C” apresentada na Figura 1.2. Nesta configuração, o deslizamento no final das extremidades carregada (s_l) e livre (s_f) podem ser medidos diretamente (*load e free end slip* na literatura inglesa, respetivamente), bem como a força de arranque.

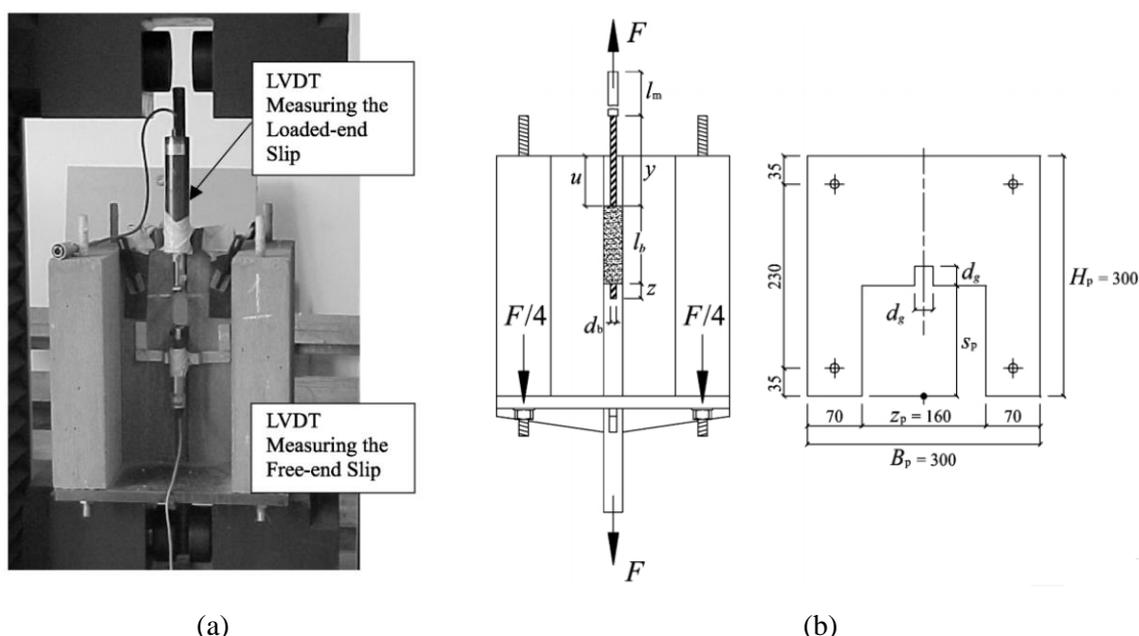
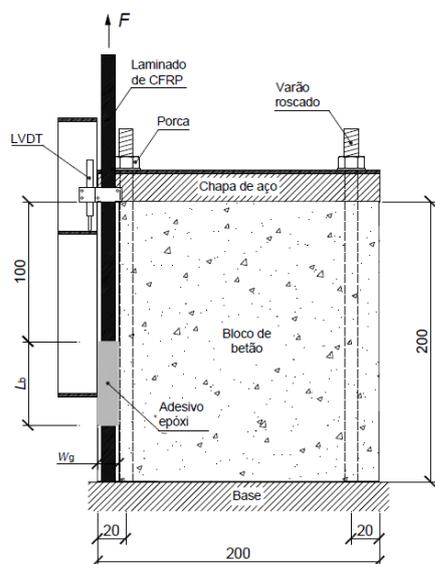
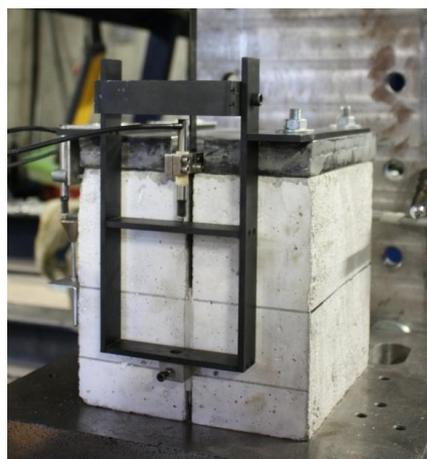


Figura 1.2 – Ensaio de aderência com provete com configuração em “C”: (a) foto do ensaio; (b) esquema do ensaio (De Lorenzis *et al.*, 2002). Nota: todas as dimensões estão em milímetros.

Fernandes *et al.* (2012) utilizaram a configuração apresentada na Figura 1.3. Neste caso são utilizados provetes cúbicos em betão com 200 mm de aresta. A distância desde o início do comprimento de ancoragem até à face superior do provete de betão é de 100 mm a fim de evitar a rotura do provete pela formação de um cone de betão com origem na extremidade carregada. Com esta configuração é possível registar o deslizamento no final da zona carregada e, com alguma dificuldade, o deslizamento na zona livre.



(a)



(b)

Figura 1.3 – Ensaio de aderência com provetes cúbicos: (a) esquema de ensaio; (b) foto do ensaio (Fernandes *et al.*, 2012). Nota: todas as dimensões estão em milímetros.

Outros autores têm vindo a propor configurações com recurso a provetes prismáticos para a caracterização da aderência. E.g. Khshain *et al.* (2015) efetuaram ensaios com os provetes representados na Figura 1.4. Nestes é possível registar o deslizamento no final da zona carregada, bem como a força de arranque.

Das configurações de ensaio apresentadas, salientam-se positivamente as configurações com recurso a provetes cúbicos relativamente aos prismáticos, pela simplicidade de confecção dos provetes de betão já que apresentam geometria bastante regular, facilidade de execução do reforço, instalação do provete e realização do ensaio.

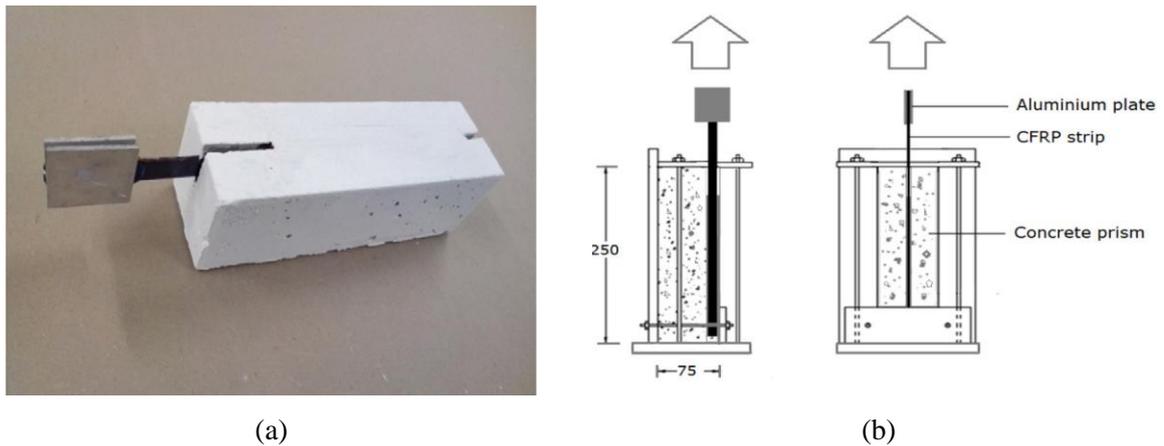


Figura 1.4 – Ensaio de aderência com provetes prismáticos: (a) foto do provete; (b) esquema do ensaio (Khshain *et al.*, 2015). Nota: todas as dimensões estão em milímetros.

- **Ensaio de arranque em flexão (BPT)**

Dois propostas têm sido usadas para realizar o ensaio de arranque em flexão (BPT): um ou dois blocos de betão ligados entre si através do elemento de reforço.

A Figura 1.5(a) apresenta o primeiro caso. Nesta configuração é colocada uma rótula metálica no topo do provete e realizado um rasgo transversal a meio vão na face inferior do provete com a intenção de provocar a formação de uma fenda localizada no centro da viga. A partir do momento em que a fenda se forma esta propaga-se até à rótula, passam a existir dois blocos de betão ligados em dois pontos, no topo através da rótula e na parte inferior pelo elemento de reforço. Desta forma, permite isolar as forças intervenientes (compressão e tração) e o momento gerado por ambas, uma vez que é conhecida à partida a distância entre o centro da rótula e a posição do FRP. Contudo, nesta configuração a propagação da fenda perturba a resposta global do sistema, sendo sempre recomendável a utilização de extensometria para registar a reais extensões instaladas no FRP.

No caso do ensaio BPT que recorre a dois blocos de betão, os dois blocos estão apenas ligados em dois pontos: inferiormente pelo elemento de reforço e superiormente pela rótula (ver Figura 1.5(b)). Neste caso, a aderência é avaliada apenas num dos blocos, definindo-se o comprimento de ancoragem que se quer estudar (ver Figura 1.5(b)) num dos blocos de betão e do outro lado é utilizado um elevado comprimento de ancoragem que garante que a rotura da ligação ocorre apenas na zona de estudo. A grande vantagem destes sistemas em relação aos DPT é a aproximação ao comportamento real de um elemento ou estrutura reforçada à flexão com

resultados permitem a construção de modelos de previsão do comportamento da ligação, bem como calibração de modelos existentes, e ainda a contribuição para a melhoria das normas de projeto existentes.

Modos de rotura observados

Os modos de rotura observados nos ensaios de arranque estão fortemente dependentes da conjugação de vários parâmetros, nomeadamente: (i) as dimensões e padrão de rugosidade das superfícies do entalhe; (ii) a forma e dimensão da seção transversal e textura da superfície do FRP; (iii) as propriedades mecânicas do betão e do material de enchimento dos entalhes; (iv) a profundidade a que o FRP é instalado; e, por fim, (vi) o comprimento de ancoragem (De Lorenzis e Teng, 2007).

Segundo (Coelho *et al.*, 2015) em ensaios de arranque podem ser identificados cinco modos de rotura. Pode ocorrer rotura pelo FRP quando a ligação tem capacidade de mobilizar a sua capacidade resistente. Nos casos em que esta ligação não tem capacidade suficiente para conduzir à rotura do laminado, quatro tipos de rotura distinta podem ser ocorrer: (i) rotura coesiva no betão circundante ao entalhe; (ii) rotura adesiva na interface betão/adesivo; (iii) rotura coesiva no adesivo; (iv) rotura adesiva na interface FRP/adesivo (ver Figura 1.6).

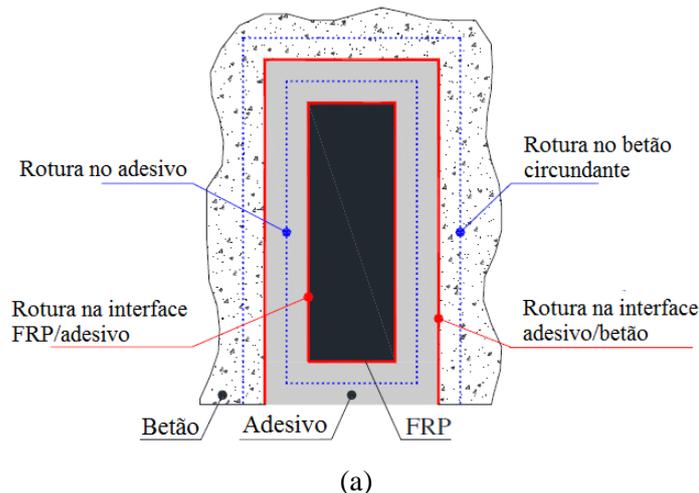


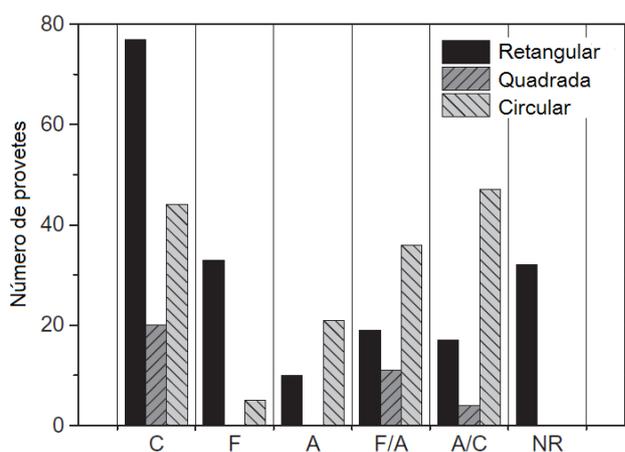
Figura 1.6 – Formas de rotura possíveis associadas à rotura na ligação (Coelho *et al.*, 2015).

Durante o ensaio, a carga é transferida do FRP até ao betão, pelo que a primeira zona crítica é a interface adesivo/FRP. A resistência associada a este modo de rotura depende essencialmente do grau de confinamento transversal da ligação, comprimento da ligação e mecanismos de

aderência entre o FRP e o adesivo. Por sua vez, a rotura no interior do adesivo também depende do nível de confinamento transversal, assim como das características mecânicas do adesivo, nomeadamente a resistência ao corte. Já a rotura na interface adesivo/betão depende dos mesmos fatores que comandam a capacidade resistente na interface do FRP e do adesivo, mas tendo em conta que agora a ligação é entre o adesivo e o betão. Por fim, a rotura no betão circundante ao entalhe de colocação do FRP está dependente do grau de confinamento transversal bem como das propriedades mecânicas do betão (Coelho *et al.*, 2015).

Refira-se que estas formas de rotura nem sempre ocorrem isoladamente, podendo existir mais do que um tipo de rotura em cada provete. Muitas vezes, isto acontece devido à rotura súbita do provete, o que impossibilita a perceção do real modo de rotura que tenha ocorrido durante o ensaio.

Coelho *et al.* (2015) coletaram também os modos de rotura observados nos ensaios que serviram de base ao estudo. Para tal, apenas foram considerados os ensaios DPT. O gráfico da Figura 1.7 apresenta os resultados obtidos bem como os modos de rotura considerados tendo em conta o tipo de secção transversal para o FRP utilizada no estudo experimental.



Nota: C – rotura no betão circundante ao entalhe; F – rotura do FRP; A – rotura do adesivo; F/A – rotura na interface FRP/adesivo; A/C - rotura na interface adesivo/betão; NR – rotura não mencionada.

Figura 1.7 – Resumo dos modos de rotura observados nos ensaios DPT da base de dados do estudo de (Coelho *et al.*, 2015).

Influência do comprimento de ancoragem

Nos estudos já realizados, vários comprimentos de ancoragem têm sido testados. Numa análise geral, o incremento do comprimento da ligação entre o laminado e o betão provoca um aumento da força máxima de arranque que a ligação tem capacidade de desenvolver. Pelo contrário, com ao aumento da área de contacto entre o FRP e o adesivo e entre o adesivo e o betão, a tensão tangencial média desenvolvida entre as duas superfícies de contacto tende a decrescer com o aumento do comprimento de ancoragem devido não só à maior área de contacto entre os materiais mas também à distribuição não uniforme das tensões de corte ao logo deste comprimento. Este facto tem vindo a ser demonstrado quer nos ensaios DPT, quer nos ensaios BPT (Coelho *et al.*, 2015).

Influência de outros parâmetros

Da revisão efetuada por Coelho *et al.* (2015), resultaram algumas conclusões adicionais sobre a influência de vários parâmetros no comportamento da ligação, apresentadas nos parágrafos seguintes.

O tipo de fibras constituintes do material FRP utilizado bem como a textura superficial da barra NSM influenciam a resposta destes sistemas de reforço. Em condições idênticas de ensaio e provetes utilizados ficou demonstrado que a força de arranque máxima que a ligação é capaz de mobilizar é superior quando são usadas fibras de carbono em comparação com fibras de vidro e por sua vez é superior quando fibras de vidro são aplicadas em detrimento das fibras de basalto. Por outro lado, as barras com superfícies lisas são mais propícias à rotura na interface FRP/adesivo.

A rugosidade do entalhe é outro parâmetro a ter em conta. Os entalhes abertos posteriormente à confeção dos elementos de betão são mais rugosos e, desta forma, os estudos realizados indicam que o comportamento é melhor nestes casos do que naqueles em que o entalhe é pré-moldado. Este último caso é bastante propenso à rotura na interface adesivo/betão.

Em termos da influência da secção transversal das barras utilizadas no reforço NSM-CFRP, é notório que as barras com secção transversal retangular são mais eficientes no que respeita à capacidade de exploração das potencialidades do FRP.

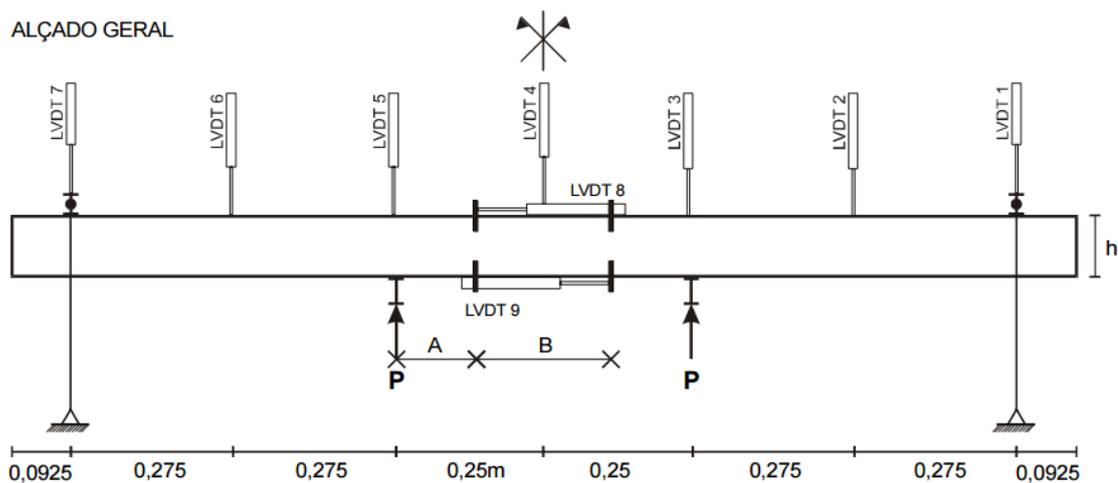
1.2.2 Comportamento à flexão

Na literatura é possível encontrar alguns estudos sobre o comportamento à flexão de faixas de laje reforçadas com sistemas NSM-CFRP; no entanto, são escassos os estudos que se correlacionem com os aspetos abordados no presente trabalho. Assim, nesta secção são apresentados dois estudos: um primeiro em que as faixas de laje são submetidas a fendilhação prévia à aplicação do reforço (comum ao presente estudo experimental) e um outro em são aplicados laminados de CFRP pré-esforçados, sendo a geometria das faixas de laje e configuração dos ensaios realizados iguais às da presente investigação.

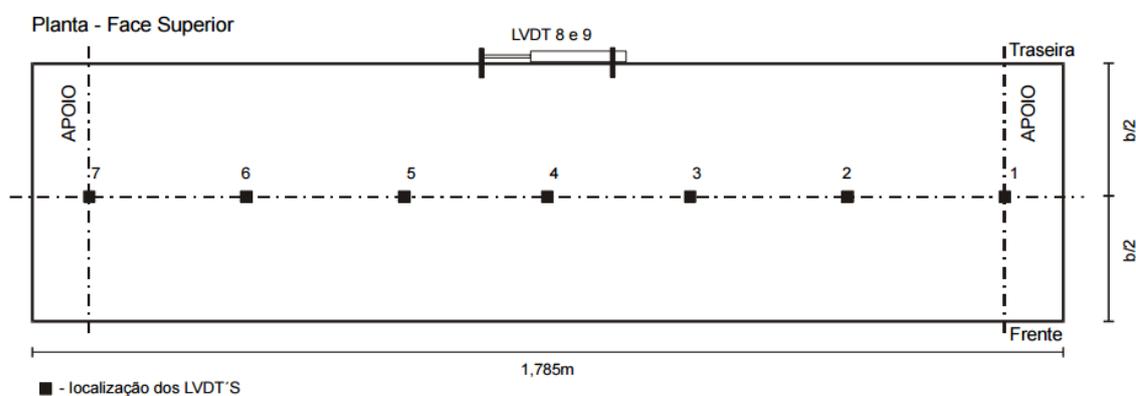
Com vista a avaliar o efeito da pré-fendilhação em faixas de laje reforçadas à flexão com sistemas NSM-CFRP, Dias *et al.* (2004) executaram um programa experimental. Dez faixas de laje de betão armado foram ensaiadas à flexão, em quatro pontos de carga. Duas foram simplesmente armadas (faixas de laje de referência) e oito foram reforçadas com sistemas compósitos de CFRP. Destas últimas, quatro são reforçadas com o sistema curado *in situ* (manta flexível) e as restantes são reforçadas com o sistema pré-fabricado (laminado). Nos dois grupos reforçados, duas faixas de laje foram solicitadas de forma a atingirem um estado de fendilhação estabilizada, previamente à colagem do reforço (pré-fendilhação). Informações gerais sobre os modelos ensaiados encontram-se na Figura 1.8.

Genericamente os autores concluíram os seguintes aspetos:

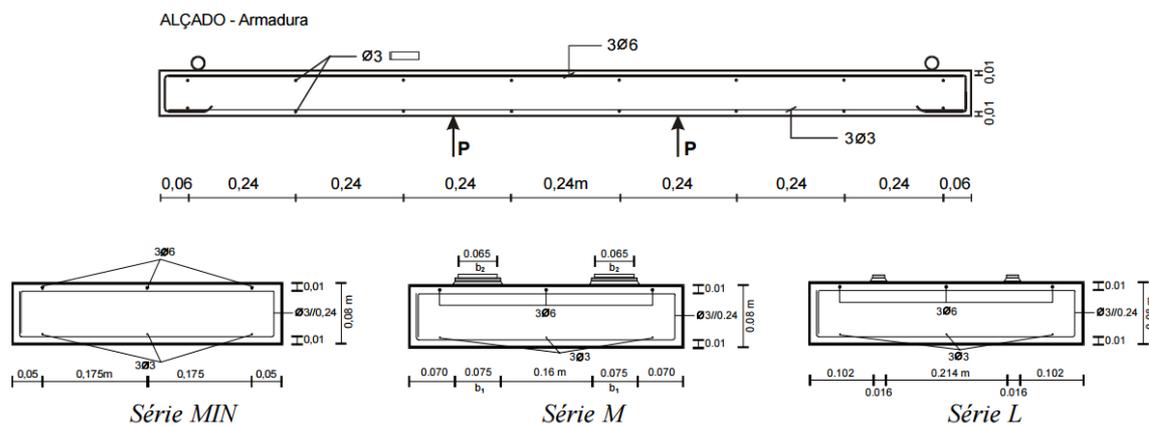
- As faixas de laje reforçadas pré-fendilhadas apresentam comportamento menos rígido comparativamente com aquelas em que não existe pré-fendilhação, até ao nível de carga aplicada para efeitos de pré-fendilhação. Após este patamar de carga, as respostas das faixas de laje correspondentes a estas duas situações tendem progressivamente a aproximar-se;
- O espaçamento médio entre fendas foi semelhante nas faixas de laje em que foi aplicado reforço, com e sem pré-fendilhação, e bastante inferior ao observado na faixa de laje de referência;
- A pré-fendilhação quase não teve influência sobre o desempenho das faixas de laje reforçadas.



(a)



(b)



(c)

Figura 1.8 – Informações gerais sobre os modelos ensaiados (Dias *et al.*, 2004). Nota: todas as dimensões estão em metros.

Mostakhdemin Hosseini *et al.* (2014) estudaram a influência da aplicação de laminados pré-esforçados com diferentes níveis de pré-esforço no comportamento à flexão de faixas de laje

reforçadas segundo a técnica NSM. Os autores testaram quatro faixas de laje. Uma faixa de laje serviu de referência e nesta não foi colocado qualquer reforço. As três faixas de laje restantes foram reforçadas com laminados aos quais foram aplicados diferentes níveis de pré-esforço: 0%, 20% e 40% da capacidade resistente última dos laminados de CFRP. O estudo incidiu não só na vertente experimental mas também na simulação numérica. A configuração de ensaio e a geometria das faixas de laje testadas pelos autores encontra-se na Figura 1.9.

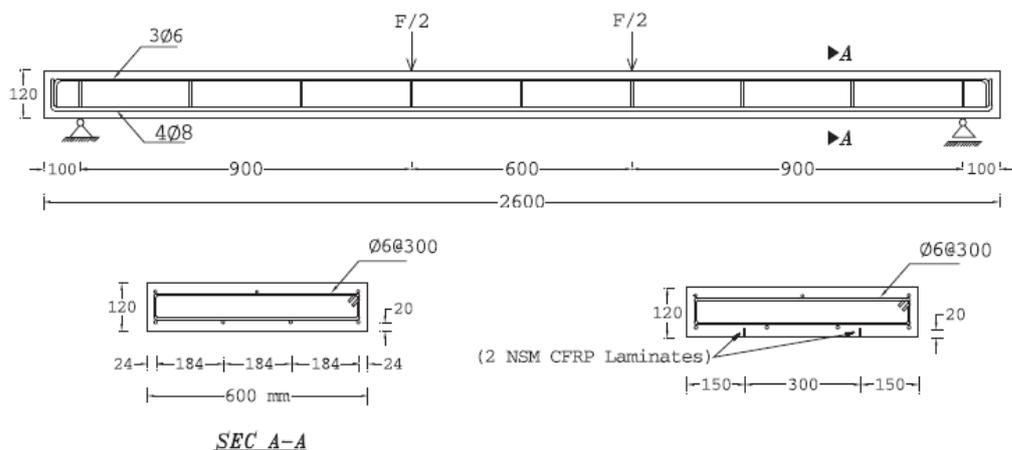


Figura 1.9 – Geometria das faixas de laje e configuração do ensaio (Mostakhdemin Hosseini *et al.*, 2014). Nota: todas as dimensões estão em milímetros.

Os resultados demonstraram que a aplicação de pré-esforço nos laminados de CFRP é uma boa solução pois aumenta as cargas de início da fendilhação, plastificação das armaduras e de rotura. Com a aplicação de 20% de pré-esforço, houve lugar a um aumento de 55% e 136% nas cargas de serviço e de rotura comparativamente com a faixa de laje utilizada para referência. Por sua vez, aumentos percentuais de 119% e 152% foram obtidos respetivamente para a carga de plastificação das armaduras e de rotura quando o nível de pré-esforço aplicado foi de 40%. Quanto à estratégia numérica seguida pelos autores do estudo para avaliar a resposta força aplicada *versus* deslocamento a meio vão, conduziu a resultados muito satisfatórios quando comparados com os resultados experimentais.

1.2.3 Estudos com diferentes adesivos

Da pesquisa efetuada conclui-se a notória ausência de estudos que comparem o comportamento de estruturas de betão armado reforçadas utilizando a técnica NSM-CFRP utilizando diferentes adesivos. No entanto existem já alguns estudos sobre o tema noutras áreas

do reforço, nomeadamente no reforço de estruturas de alvenaria com recurso a FRP. Nestas aplicações é também utilizado um adesivo para efetuar a adesão entre o FRP e o substrato de alvenaria. O comportamento observado depende naturalmente não só das características do FRP e do substrato reforçado, mas também do tipo de adesivo utilizado.

De forma a avaliar a influência das propriedades dos adesivos e da geometria dos laminados no comportamento dos ensaios de aderência, Macedo *et al.* (2008) levaram a cabo um programa experimental. Como objetivos tinham a avaliação da influência dos seguintes aspetos: (i) o comprimento de ancoragem; (ii) a profundidade a que é inserido o laminado no entalhe; (iii) a altura da secção transversal do laminado; (iv) o tipo de adesivo usado na ligação laminado/betão.

Inicialmente foi realizada uma avaliação da capacidade resistente dos adesivos. Foram selecionados os adesivos *S&P Resin 220* e o *Grout ASR* da *Quimidois*. O primeiro foi selecionado por apresentar melhores características mecânicas e o segundo por apresentar melhores resultados sob temperatura elevada.

A configuração de ensaio de arranque direto encontra-se representada na Figura 1.10.

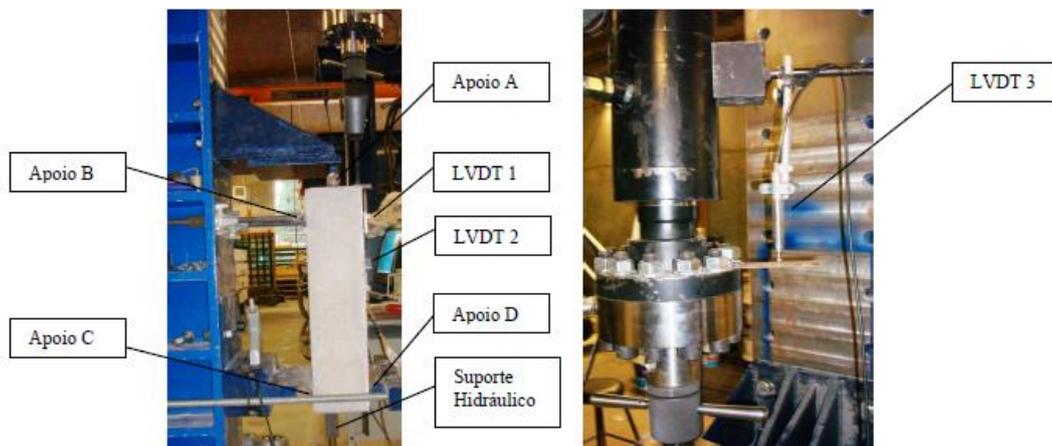


Figura 1.10 – Fotografias de configuração de ensaio usado por (Macedo *et al.*, 2008).

Os autores concluíram, de forma genérica, os seguintes aspetos:

- Para os comprimentos de amarração superiores (i.e. superiores a 90 mm), existe uma tendência para a rotura se dar pelo laminado ou pelo betão;
- A profundidade de colocação do laminado no entalhe, bem como o comprimento de ancoragem influenciam o valor de carga máxima alcançada. Este valor aumenta com o aumento da profundidade de colocação no entalhe e também com o aumento do comprimento de ancoragem;
- Para comprimentos de ancoragem sucessivamente crescentes até ao que conduz à rotura do laminado, o valor do deslizamento no final da zona carregada correspondente à força máxima, aumenta com aumento do comprimento de ancoragem;
- A composição do *Grout ASR* terá que sofrer algumas alterações, uma vez que a carga máxima atingida é bastante baixa.

Com o objetivo de comparar o comportamento de estruturas de alvenaria reparadas com adesivos rígidos e flexíveis, Kwiecień (2012) levou a cabo um estudo em que efetuou ensaios de aderência entre laminados de CFRP e substratos de alvenaria utilizando quer com adesivos com comportamento rígido, quer com adesivos que se comportam de forma mais flexível.

Foram efetuados dois tipos de ensaios e utilizados seis tipos de adesivos: uma resina epoxídica (adesivo rígido) e cinco polímeros de poliuretano (adesivos flexíveis). A Figura 1.11 apresenta os dois tipos de ensaios efetuados. Nos ensaios de *pul-off* foram aplicados todos os tipos de adesivos, enquanto nos ensaios de *single-lap* apenas foram utilizados dois adesivos, a saber: a resina epoxídica e um polímero de poliuretano (*Polymer PS*).

Nos ensaios do tipo *single-lap*, comparando a evolução da força ao longo do tempo e do deslocamento do CFRP foi possível observar que o adesivo de base polimérica conduz a respostas mais flexíveis que com o adesivo de base epoxídica. O nível de carga última registado para o adesivo flexível é cerca de 42% superior com o uso do adesivo *Polymer PS* quando comparado com o *Sikadur® 30*. Por sua vez o deslocamento na rotura também aumentou (aproximadamente 63%).

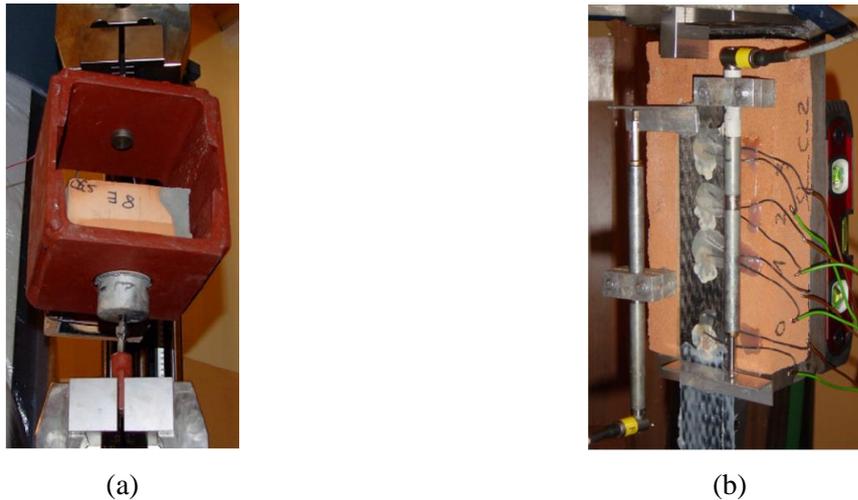


Figura 1.11 – Testes de aderência em substratos de alvenaria: (a) *pull-off test*; (b) *single-lap test* (Kwiecień, 2012).

Assim, o autor demonstrou que o adesivo flexível é mais eficaz na reparação de estruturas de alvenaria do que o rígido uma vez que existe uma redução nas concentrações de tensões e uma distribuição equitativa destas mesmas tensões ao longo do comprimento da ligação proporcionada pela grande flexibilidade do adesivo. Por outro lado, o deslizamento na extremidade do comprimento da ligação é muitas vezes superior ao registado nos provetes em que é utilizado um adesivo rígido, o que implica uma energia de fratura maior quando os adesivos flexíveis são usados.

Demonstrada a eficiência dos adesivos flexíveis na aplicação anterior, justifica-se a avaliação da sua viabilidade em aplicações a estruturas de betão armado reforçadas com FRP de acordo com a técnica NSM.

1.3 Objetivos

A técnica NSM apresenta atualmente um estado de conhecimento considerável, alguns deles destacados na secção anterior. No entanto existem muitos aspetos que requerem estudos dedicados. Um deles relaciona-se com a avaliação da influência do tipo de adesivo no comportamento de estruturas de betão com sistemas NSM-CFRP. Este assunto é o principal enfoque da presente dissertação, a qual inclui uma forte componente experimental e simulações analíticas.

Assim, o principal objetivo da presente dissertação é contribuir para o conhecimento do comportamento de estruturas de betão com sistemas NSM-CFRP quando são usados distintos adesivos. Este principal objetivo é assegurado por intermédio de um conjunto de objetivos intercalares, que em seguida se enumeram:

- Efetuar pesquisa bibliográfica em áreas afins à temática em estudo, nomeadamente, aderência e comportamento à flexão de estruturas de betão com sistemas NSM-CFRP;
- Desenvolver por via experimental estudos para avaliar o efeito do módulo de elasticidade do adesivo no comportamento da aderência de sistemas NSM-CFRP;
- Proceder à simulação analítico-numérica dos ensaios experimentais de aderência;
- Realizar estudos experimentais sobre a influência do tipo de adesivo no comportamento à flexão de lajes de betão armado reforçadas com sistemas NSM-CFRP;
- Avaliar por via experimental o efeito da pré-fendilhação na resposta à flexão de lajes de betão armado reforçadas com sistemas NSM-CFRP.

1.4 Estrutura da dissertação

No Capítulo 2 é apresentada a metodologia desenvolvida para avaliação da influência do tipo de adesivo no comportamento de elementos de betão reforçados segundo a técnica NSM. São descritos os programas de ensaios, a geometria dos protótipos utilizados, bem como as configurações de ensaio utilizadas. Também são apresentadas as propriedades mecânicas dos materiais utilizados, bem como os passos efetuados na preparação dos elementos submetidos a ensaio.

No Capítulo 3 são apresentados os resultados obtidos dos ensaios de arranque direto. É efetuada uma análise detalhada dos resultados obtidos. É também apresentada uma análise comparativa entre o comportamento verificado com os diferentes adesivos.

No Capítulo 4, os resultados dos ensaios de flexão em faixas de laje são apresentados. É efetuada uma análise aos vários parâmetros obtidos durante o ensaio. São também apresentadas comparações entre o comportamento observado na presença de diferentes adesivos, bem como sobre a influência que a pré-fendilhação tem no comportamento de faixas de laje sujeitas à flexão.

No Capítulo 5 é utilizada uma metodologia analítico-numérica para a caracterização da aderência de sistemas NSM-CFRP, através da caracterização da lei local tensão de corte *versus* deslizamento. Esta estratégia é sumariamente descrita. Os resultados são obtidos com base nos resultados experimentais apresentados no Capítulo 3. As leis locais obtidas são objeto de análise.

Finalmente, no Capítulo 6 é apresentado um resumo geral dos estudos efetuados, bem como as principais conclusões extraídas. Algumas sugestões para trabalhos futuros são também apresentadas.

CAPÍTULO 2

PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Introdução

O programa experimental da presente dissertação teve como objetivo principal caracterizar a influência do tipo de adesivo no comportamento de elementos de betão, reforçados segundo a técnica NSM utilizando laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento, a dois níveis distintos: (i) à mesoescala com recurso a ensaios de aderência e (ii) à escala real com recurso a ensaios de flexão em faixas de laje. Estes trabalhos experimentais desenvolveram-se no Laboratório de Estruturas (LEST) da Universidade do Minho.

Tal como referido anteriormente, os ensaios realizados dividem-se em dois grupos distintos: (i) ensaios de aderência de arranque direto e (ii) ensaios de flexão em faixas de laje. Os primeiros tiveram como objetivo investigar o comportamento da ligação entre o laminado de CFRP e o betão de acordo com a técnica NSM (sistema NSM-CFRP). Neste contexto, as variáveis a estudar foram: (i) o tipo de adesivo; (ii) o comprimento de ancoragem (L_b); e, (iii) o tipo de laminado de CFRP e correspondente a geometria de entalhe. Por sua vez, nos ensaios de flexão em faixas de laje pretendia-se caracterizar o comportamento mecânico destas para sistemas NSM-CFRP, sendo que as variáveis de estudo eram: (i) o tipo de adesivo; e, (ii) existência ou não de pré-fissuração.

Assumindo que as estruturas de betão correntes que necessitam de ser reforçadas apresentam betões com resistências médias à compressão (f_{cm}) que variam entre 30 e 50 MPa, optou-se pelo uso de um betão da classe C30/37 ($f_{cm}=38$ MPa) para todos os elementos de betão incluídos no presente estudo.

Os trabalhos experimentais foram realizados em parceria com outra dissertação de mestrado, pelo que alguns resultados são comuns, no entanto a análise e discussão desses mesmos resultados realizaram-se de forma completamente independente.

2.2 Ensaios de arranque direto

2.2.1 Programa de ensaios

De forma a caracterizar o comportamento da interface entre o laminado de CFRP e o betão, composta por CFRP/adesivo/betão, foi estabelecido um programa experimental constituído por ensaios de arranque direto em que foram usados dois tipos de laminados de CFRP com secção transversal diferente: (i) $10 \times 1.4 \text{ mm}^2$ e (ii) $20 \times 1.4 \text{ mm}^2$. Por outro lado, foram também usados três tipos de adesivos distintos que asseguravam a ligação do laminado de CFRP e o betão: (i) Adesivo 1; (ii) Adesivo 2; e, (iii) Adesivo 3. Por fim, o comprimento de ancoragem (ou amarração) do laminado também variou, tendo sido adotados comprimentos de 50, 60, 80, 100, 200 e 300 mm. Devido ao intervalo de comprimentos de ancoragem usados, houve a necessidade de recorrer a dois tipos de elementos de betão com distintas características geométricas, a saber: (i) provetes cúbicos e, (ii) provetes prismáticos. Para efeitos da presente dissertação, assume-se que a geometria do elemento de betão usado não tem influência significativa sobre os resultados dos ensaios de aderência. Contudo, esta afirmação carece de comprovação científica, a qual, por razões de limitações de tempo, não foi possível comprovar. Para os menores comprimentos de ligação foram usados provetes cúbicos de betão (50, 60, 80 e 100 mm) enquanto que para comprimentos maiores recorreu-se aos provetes prismáticos de betão (200 e 300 mm). Refira-se que o uso dos primeiros está relacionado com o facto de ser um sistema de ensaio amplamente usado e validado no LEST (e.g. Garzón-Roca *et al.* (2015)), enquanto que o segundo devido ao facto de não ser possível usar o primeiro para comprimentos maiores. O recurso a vários L_b teve como objetivo último a determinação do comprimento ancoragem que era capaz de levar cada tipo de laminado de CFRP à rotura, para cada tipo de adesivo.

A Tabela 2.1 apresenta a designação adotada para série usada no programa experimental estabelecido para os ensaios de arranque direto. Cada série é constituída por 3 provetes de forma a obterem-se resultados mais fiáveis, face à dispersão expetável. A designação genérica para as séries é ADHX_LYY_LbZZ, onde X representa o número do adesivo, YY denomina a largura do laminado em milímetros, e ZZ apresenta o comprimento de ancoragem do laminado de CFRP em milímetros.

2.2.2 Geometrias e configurações de ensaio

2.2.2.1 Provetes cúbicos

A Figura 2.1 apresenta a geometria do provete cúbico bem como a configuração do ensaio adotada para o estudo da aderência para L_b até 100 mm. Estes provetes de betão tem 200 mm de aresta, existindo nas diferentes faces um entalhe com 5 mm de largura e profundidade dependente da secção transversal do laminado (15 mm para laminado com secção transversal de $10 \times 1.4 \text{ mm}^2$ e 25 mm para laminado com secção transversal de $20 \times 1.4 \text{ mm}^2$) na qual o laminado de CFRP é embebido segundo a técnica NSM (ver Figura 2.1(b)). A zona de ancoragem do laminado de CFRP ao betão inicia-se a 100 mm da face superior do provete de forma a evitar a rotura prematura provocada pela formação de um cone de betão na extremidade carregada, exceto para o caso dos provetes reforçados com o Adesivo 3 e laminado de secção transversal de $10 \times 1.4 \text{ mm}^2$ onde a distância à face superior foi reduzida para 50 mm.

Tabela 2.1 – Designação das séries usadas no estudo da aderência.

Adesivo	Geometria do elemento de betão	Secção transversal do laminado ⁽¹⁾ [mm ²]	Comprimento de ancoragem [mm]	Designação
Adesivo 1	Cubo	10×1.4	60	ADH1_L10_Lb60
			80	ADH1_L10_Lb80
			100	ADH1_L10_Lb100
	Cubo	20×1.4	80	ADH1_L20_Lb80
			100	ADH1_L20_Lb100
	Prisma	20×1.4	200	ADH1_L20_Lb200
300			ADH1_L20_Lb300	
Adesivo 2	Cubo	20×1.4	80	ADH2_L20_Lb80
			100	ADH2_L20_Lb100
	Prisma	20×1.4	200	ADH2_L20_Lb200
			300	ADH2_L20_Lb300
Adesivo 3	Cubo	10×1.4	50	ADH3_L10_Lb50
			100	ADH3_L10_Lb100
			150	ADH3_L10_Lb150
	Cubo	20×1.4	80	ADH3_L20_Lb80
			100	ADH3_L20_Lb100

⁽¹⁾ Largura × espessura.

No ensaio é colocada uma chapa de aço com 20 mm de espessura na face superior do cubo de betão. A chapa de aço é fixa à base do pórtico de ensaio através de 4 varões roscados M10 aos quais é aplicado um momento de aperto de 30 N×m que induz uma tensão de compressão uniforme ao betão de aproximadamente 2.0 MPa, prévia ao início do ensaio. Este procedimento visa garantir que o deslocamento vertical do cubo durante o ensaio seja desprezável. Todos os ensaios realizaram-se com recurso a um sistema hidráulico servo-controlado, sendo a força de arranque (F) medida através de uma célula de carga (com capacidade máxima de 200 kN e precisão de 0.05% F.S.) colocada entre o atuador e garra para fixação da extremidade do laminado. Para medir o deslizamento, i.e. o deslocamento relativo entre o betão e o laminado de CFRP, na extremidade carregada do comprimento de ancoragem (s_l – *loaded end slip* na literatura inglesa) é usado um transdutor de deslocamentos - LVDT (*linear variable differential transducer* na literatura inglesa) com uma amplitude de medida de ± 10 mm (precisão de 0.24% F.S.). Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento na extremidade carregada com duas velocidades distintas dependentes do adesivo em estudo: (i) adesivos 1 e 2 – 2 $\mu\text{m/s}$; (ii) adesivo 3 - 5 $\mu\text{m/s}$. A opção de distintas velocidades de ensaio deveu-se ao facto dos adesivos objeto de estudo apresentarem distintos níveis de deformabilidade e, consequentemente, distintos tempos de duração dos respetivos ensaios.

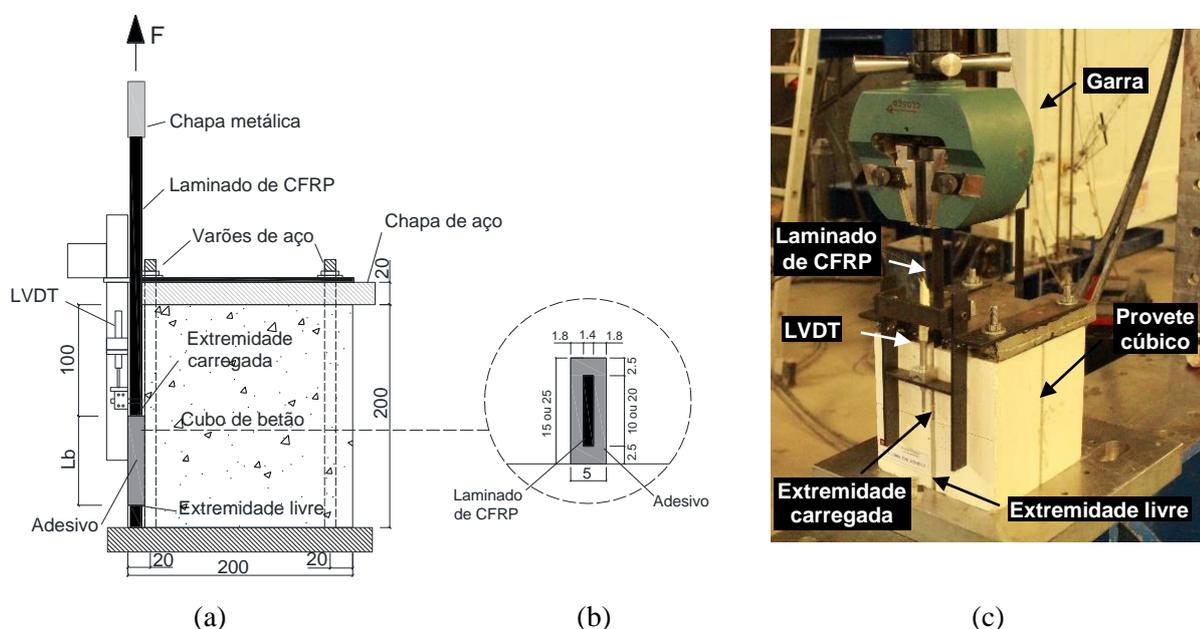


Figura 2.1 – Geometria e configuração de ensaio de arranque direto para o caso dos provetes cúbicos: (a) geometria e configuração de ensaio; (b) detalhe do reforço; (c) foto do ensaio. Nota: todas as dimensões estão em milímetros.

2.2.2.2 Provetes prismáticos

Tal como referido anteriormente, os provetes de betão com forma prismática foram usados para estudo da aderência na presença de comprimentos de ancoragem (L_b) mais elevados (200 e 300 mm). A Figura 2.2 apresenta o provete e a configuração do ensaio de aderência em prismas. Estes provetes tem dimensões de $150 \times 150 \times 600 \text{ mm}^3$ e na sua face lateral foi aberto um entalhe com 5 mm de largura e 25 mm de profundidade para colocação do laminado de secção transversal $20 \times 1.4 \text{ mm}^2$ embebido no respetivo adesivo. Tal como nos provetes cúbicos, a distância da extremidade superior do comprimento de ancoragem à face superior do prisma foi de 100 mm.

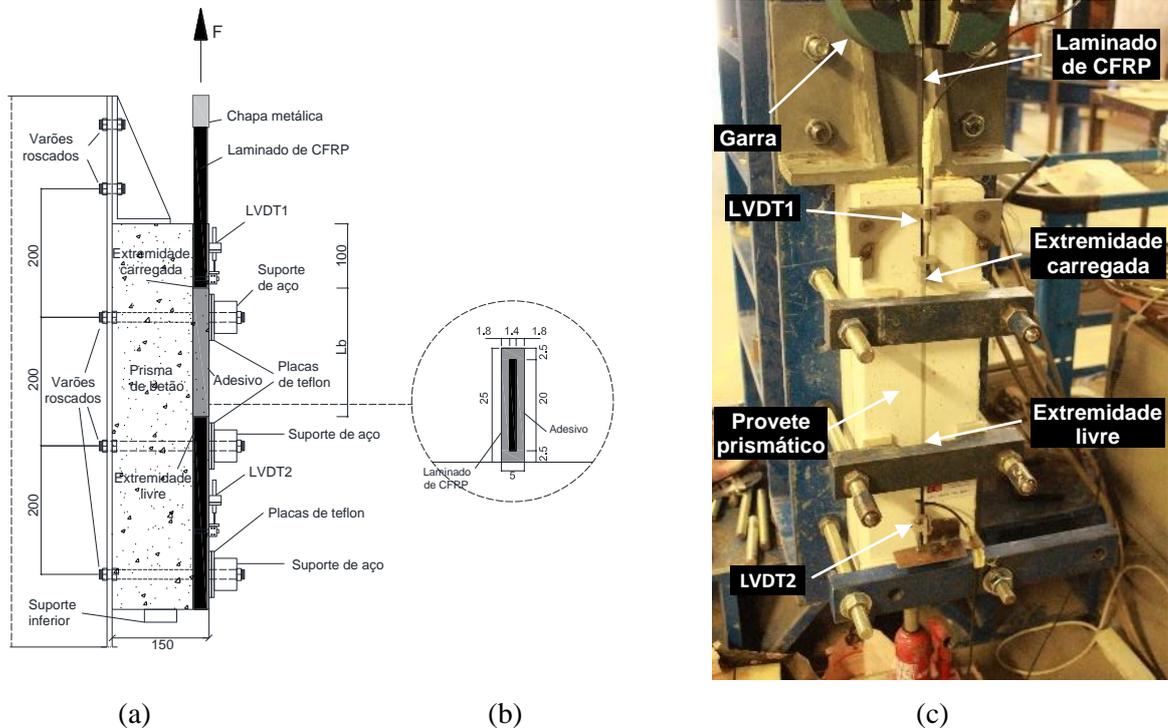


Figura 2.2 – Geometria e configuração de ensaio de arranque direto para o caso dos provetes prismáticos: (a) geometria e configuração de ensaio; (b) detalhe do reforço; (c) foto do ensaio. Nota: todas as dimensões estão em milímetros.

O esquema de ensaio de aderência utilizando provetes prismáticos é apresentado na Figura 2.2(a). O ensaio é realizado com o provete de betão orientado verticalmente. A face posterior à face do reforço encontra-se apoiada num perfil metálico que se encontra fixo no pórtico de ensaio. Na base, o provete é fixo através de um macaco hidráulico enquanto na face superior os deslocamentos verticais são impedidos através de uma chapa.

Na face do reforço a fixação é efetuada por intermédio de 3 barras metálicas horizontais de modo a evitar deslocamentos do provete no plano do pórtico de ensaio. Estas barras são colocados respetivamente a 145, 345 e 545 mm da face superior do provete. Para evitar a existência de atrito entre as barras frontais e o provete de betão foram colocadas duas placas de *teflon* entre o provete e os suportes laterais. De forma a garantir a regularidade da superfície superior e a assegurar a distribuição uniforme de tensões durante o ensaio foi aplicado um regularizador de superfície.

Para os presentes ensaios foi utilizado um sistema de instrumentação similar aos dos provetes cúbicos, descrito anteriormente. Adicionalmente, no presente caso foi também monitorizado o deslizamento na extremidade livre (s_f - *free end slip* na literatura inglesa), através de um LVDT de características similares ao usado para registar o deslizamento na extremidade carregada. Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamentos através do mesmo procedimento usado nos provetes cúbicos.

2.3 Ensaios de flexão em faixas de laje

2.3.1 Programa de ensaios

Para avaliar o comportamento de faixas de laje à flexão reforçadas segundo a técnica NSM, na presença de diferentes adesivos para a ligação entre o laminado de CFRP e o betão foi desenvolvido um programa de ensaios constituído por sete faixas em laje de betão armado.

Foram avaliados três tipos de adesivos: (i) adesivo 1; (ii) adesivo 2; e, (iii) adesivo 3. Assim, usaram-se os mesmos adesivos que nos ensaios de arranque direto, com o objetivo de estabelecer correlações entre o comportamento estrutural em flexão de faixas de laje à escala real e a aderência do sistema NSM-CFRP à mesoescala. Para cada tipo de adesivo, foi estudado o efeito da existência ou não de fendilhação prévia à aplicação do reforço no comportamento à flexão do sistema NSM-CFRP. Para tal usaram-se duas lajes, sendo uma pré-fendilhada e a outra sem qualquer tipo de fendilhação prévia. Uma vez que na generalidade das estruturas que possam vir a ser reforçadas, segundo a técnica em análise, muito provavelmente aquando da aplicação do reforço já possuirão algum nível de fendilhação, a inclusão desta variável de estudo neste programa de ensaios afigura-se como fundamental. Por fim, será ainda de referir

que no âmbito deste programa de ensaios experimentais foi ainda incluída uma faixa de laje de sem qualquer tipo de reforço, designada por laje de referência.

A Tabela 2.2 apresenta o programa de ensaios experimentais realizado. A designação adotada para cada laje apresenta a seguinte forma genérica SL_ADHX_U ou SL_ADHX_C, onde X representa o número do adesivo usado no reforço da faixa de laje, U simboliza ausência de pré-fendilhação (U - *uncracked*) e C representa a presença de pré-fendilhação (C - *cracked*). A laje de referência é designada por SL_REF.

Tabela 2.2 – Designação das faixas de laje usadas no presente programa experimental.

Designação do adesivo	Secção transversal do laminado ⁽¹⁾ [mm ²]	Pré-fendilhação ⁽²⁾	Designação
-	-	-	SL_REF
Adesivo 1	20×1.4	N	SL_ADH1_U
		S	SL_ADH1_C
Adesivo 2		N	SL_ADH2_U
		S	SL_ADH2_C
Adesivo 3		N	SL_ADH3_U
		S	SL_ADH3_C

Notas: ⁽¹⁾ Largura × espessura; ⁽²⁾ N – ausência de pré-fendilhação; S – presença de pré-fendilhação

2.3.2 Geometria e configuração do ensaio

Na Figura 2.3 é apresentada a geometria das faixas de laje, os detalhes do sistema de reforço em estudo e a configuração do ensaio utilizada. Estas faixas de laje tem comprimento de 2600 mm, 600 mm de largura e 120 mm de espessura. A armadura longitudinal inferior é composta por quatro varões com 8 mm de diâmetro (4Ø8), à qual corresponde uma taxa de armadura longitudinal de tração (ρ_l) de 0.28%. A armadura longitudinal superior é constituída por 3 varões com 6 mm de diâmetro (3Ø6). Já a armadura de distribuição é materializada por estribos de 6 mm de diâmetro espaçados de 300 mm (Ø6@0.30). As armaduras adotadas foram dimensionadas para que, quer para a laje de referência, quer para as lajes reforçadas, ficasse mitigada a rotura por esforço transversal e fosse assegurado que as armaduras de flexão tracionadas plastificassem. Adotou-se 20 mm para a espessura da camada de recobrimento

A solução de reforço adotada para as faixas de laje é constituída por dois laminados de CFRP de secção transversal de $1.4 \times 20 \text{ mm}^2$ aplicados no betão de recobrimento segundo a técnica NSM. Com a sua aplicação, a percentagem total equivalente de armadura longitudinal de tração ($\rho_{s,eq}$) é de 0.39%, tendo sido determinada com base na equação incluída em Sena-Cruz *et al.* (2012). Refira-se que esta quantidade de reforço teve como objetivo a duplicação da capacidade de carga última em relação à faixa de laje de referência (SL_REF). Os entalhes para a introdução dos laminados apresentam secção transversal constante de com 5 mm de largura e 25 mm de profundidade. O laminado apenas foi aplicado num comprimento de 2200 mm, existindo em cada extremidade da laje 200 mm onde não está presente laminado. Tal opção estava relacionada com o assegurar da ausência de efeito de confinamento promovido pelos apoios nas extremidades em relação ao sistema de reforço.

A Figura 2.3(c) ilustra a configuração do ensaio utilizada. Existem quatro pontos de carga de forma a solicitar a faixa de laje aos esforços pretendidos. A distância entre apoios inferiores (vão) é de 2400 mm, sendo o vão de corte de 900 mm (i.e. igual 7.5 vezes a espessura da laje).

A instrumentação das faixas de lajes incluiu a mediação da carga aplicada, dos deslocamentos verticais ao longo do seu eixo longitudinal, das extensões em distintas secções dos laminados de CFRP e das extensões da armadura longitudinal inferior e betão na zona de compressão máxima a meio vão. Em duas das quatro armaduras inferiores foram colocados dois extensómetros (SG1 e SG2), um em cada, a meio vão e no betão na fibra superior mais comprimida foi também aplicado outro extensómetro (SG3). Por fim, nos laminados foram colocados cinco extensómetros (SG4 a SG8), existindo em cada laje apenas um laminado instrumentado com quatro extensómetros, sendo apenas colocado um no outro laminado de CFRP, a meio vão (SG4), como se ilustra na Figura 2.3(b). Na mediação das extensões nos laminados a armadura longitudinal usaram-se extensómetros TML BFLA-5-3-3L, enquanto que para a medição das extensões no betão foram usados extensómetros TML PFL-30-11-3L. Para monitorizar os deslocamentos verticais ao longo do eixo longitudinal da laje foram colocados cinco LVDT's (LVDT1 a LVDT5) tal como é apresentado na Figura 2.3(c). Os LVDT1 e LVDT5 têm um campo de medida de $\pm 25 \text{ mm}$ (precisão de 0.09% F.S.), enquanto que no caso dos LVDT2 a LVDT4, o campo de medida é de $\pm 75 \text{ mm}$ (precisão de 0.08% F.S.). Por sua vez, a força aplicada (F) foi monitorizada através de uma célula de carga com capacidade máxima de 200 kN (precisão de $\pm 0.05\%$ F.S.). Os ensaios foram realizados sob

controlo de deslocamento através do LVDT3, tendo sido adotada uma velocidade constante de 20 $\mu\text{m/s}$.

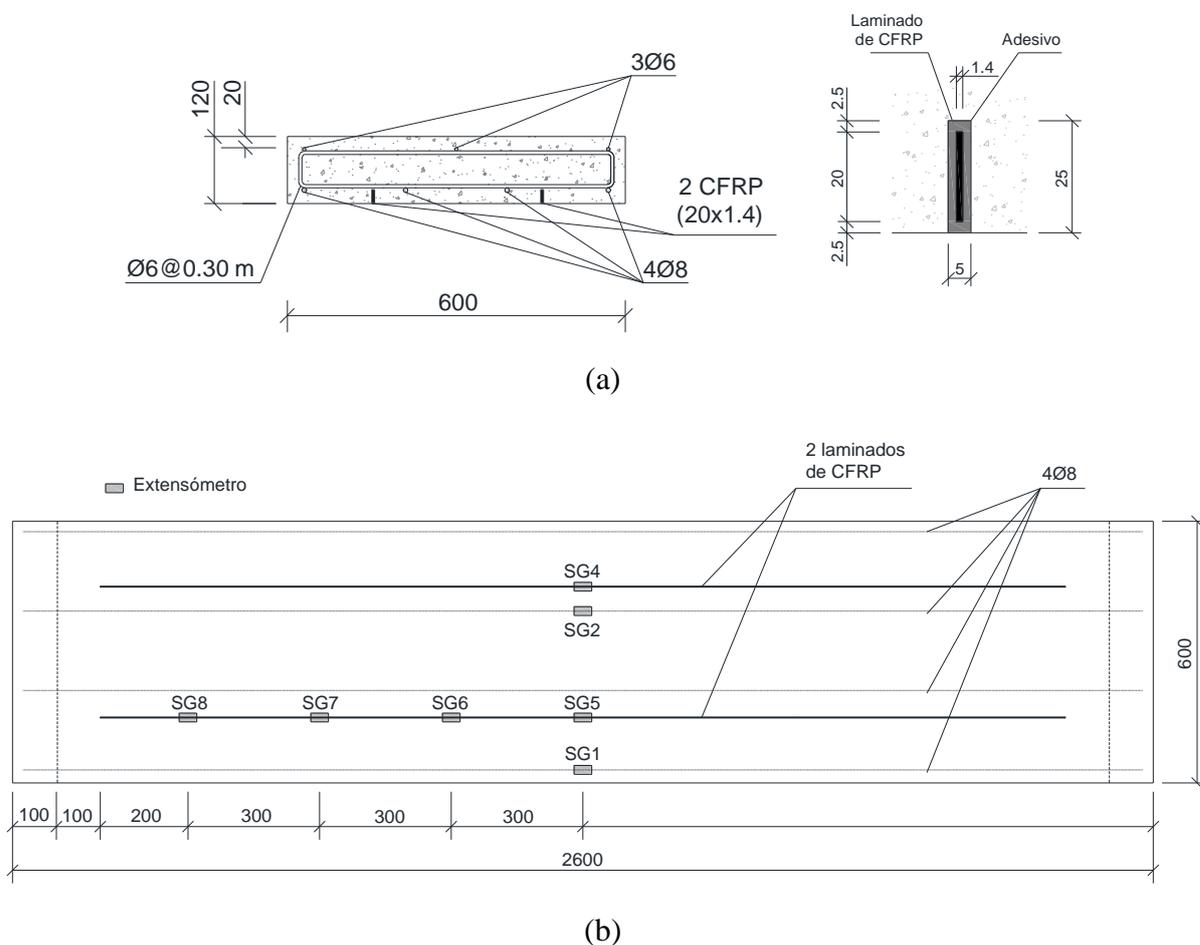
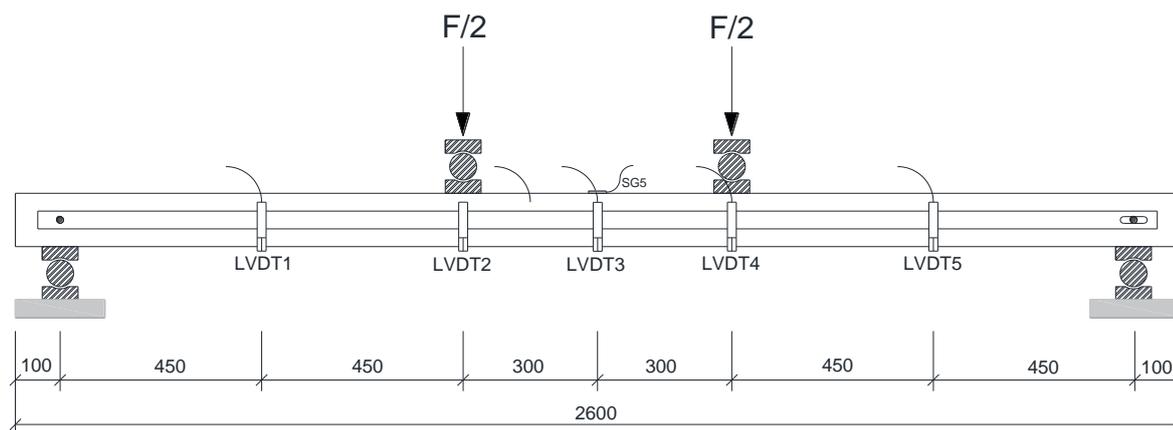


Figura 2.3 – Faixas de laje: (a) geometria da secção transversal e detalhe do reforço; (b) geometria longitudinal e posição dos extensómetros. Nota: todas as dimensões estão em milímetros.



(c)



(d)



(e)

Figura 2.3 (cont.) – Faixas de laje: (c) configuração do ensaio; (d) e (e) fotos do ensaio. Nota: todas as dimensões estão em milímetros.

2.4 Caracterização dos materiais

2.4.1 Betão

A betonagem dos provetes cúbicos e prismáticos, bem como das faixas de laje e dos cilindros (para determinação das propriedades mecânicas do betão) ocorreu toda de uma só vez através de uma única amassadura. A amassadura decorreu nas instalações da empresa Tecnipor Lda. tendo o betão sido fornecido pela empresa Unibetão - Indústrias de Betão Preparado, S.A., com as seguintes características: classe de resistência C30/37; classe de exposição XC4; máxima dimensão dos agregados 12.5 mm; *slump* S3; cimento CEM II/A-L 42,5R. A composição do betão encontra-se detalhada na Tabela 2.3.

A caracterização das propriedades mecânicas à compressão do betão foi efetuada em dois momentos distintos: aos 28 dias de idade do betão e no momento dos ensaios das faixas de laje, ou seja, com aproximadamente 110 dias de idade após a betonagem, o que perfaz cerca de três meses e meio de cura.

Tabela 2.3 – Composição do betão usado.

Classe de resistência do Betão	Agregados [kg/m ³]		Cimento [kg/m ³]	Adjuvantes [kg/m ³]	Água [kg/m ³]	Razão A/L
	Grossos	Finos				
C30/37	907	915	310	4.96	175	0.58

A determinação da resistência à compressão e o módulo de elasticidade seguiu as recomendações presentes nas normas LNEC E397-1993 (1993) e NP EN 12390-3:2011, respetivamente. Assim, foram utilizados seis cilindros (três em cada data de avaliação) com diâmetro de 150 mm e altura de 300 mm. Cada um dos cilindros foi inicialmente usado para determinação do módulo de elasticidade tendo sido posteriormente ensaiado até à rotura. Uma vez que não se ensaiou previamente nenhum provete à rotura, a tensão de compressão a aplicar para determinação do módulo de elasticidade em compressão foi estipulada segundo a norma, tendo por base que a tensão de rotura do provete seria cerca de 38 MPa. Como este aspeto foi confirmado posteriormente, foi possível validar a carga estipulada para realização dos ensaios de módulo de elasticidade

Os resultados em termos médios da resistência à compressão (f_{cm}) e módulo de elasticidade (E_{cm}) aos 28 dias de idade e aquando dos ensaios de flexão das faixas de laje são apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Características mecânicas à compressão do betão usado.

Idade do betão	f_{cm} [MPa]	E_{cm} [GPa]
28 dias	35.38 (4.8 %)	27.01 (0.5%)
110 dias	38.52 (2.1%)	28.27 (2.5%)

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

Com base nos resultados obtidos, constata-se que aos 28 dias de idade o betão não atingiu a resistência característica expetável ($f_{ck} = 30 \text{ MPa} = f_{cm} - 8 \text{ MPa}$). Para tal facto poderiam ter contribuído as condições de cura efetivamente usadas (ambiente de estaleiro) e não as recomendadas pela NP EN 12390-2:2009 (cura em água a $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$). Aos 110 dias, o valor de f_{ck} foi aproximadamente de 31 MPa, estando por isso, a resistência à compressão bastante próxima do pretendido (classe de resistência C30/37).

2.4.2 Varões de aço

O aço utilizado para o fabrico das armaduras é da classe A400 NR. Para avaliar as características mecânicas das armaduras ($\varnothing 6$ e $\varnothing 8$) foram realizados ensaios de tração uniaxial em controlo de deslocamento com velocidades de 0.05 mm/s para a fase elástica e 0.5 mm/s após a cedência das armaduras. Foram testados três varões de cada diâmetro. O comprimento de ensaio dos varões foi de 550 e 600 mm respetivamente para os varões com diâmetro de secção transversal 6 e 8 mm. Na Figura 2.4 apresentam-se as curvas força *versus* extensão obtidas para os varões de aço. Os resultados médios obtidos para a tensão de cedência (f_y) e tensão última (f_u) são apresentados na Tabela 2.5. Tendo em conta a classe de aço escolhida e com base nos resultados obtidos dos ensaios realizados, conclui-se que o aço apresentou características de resistência superiores ao que era espectável.

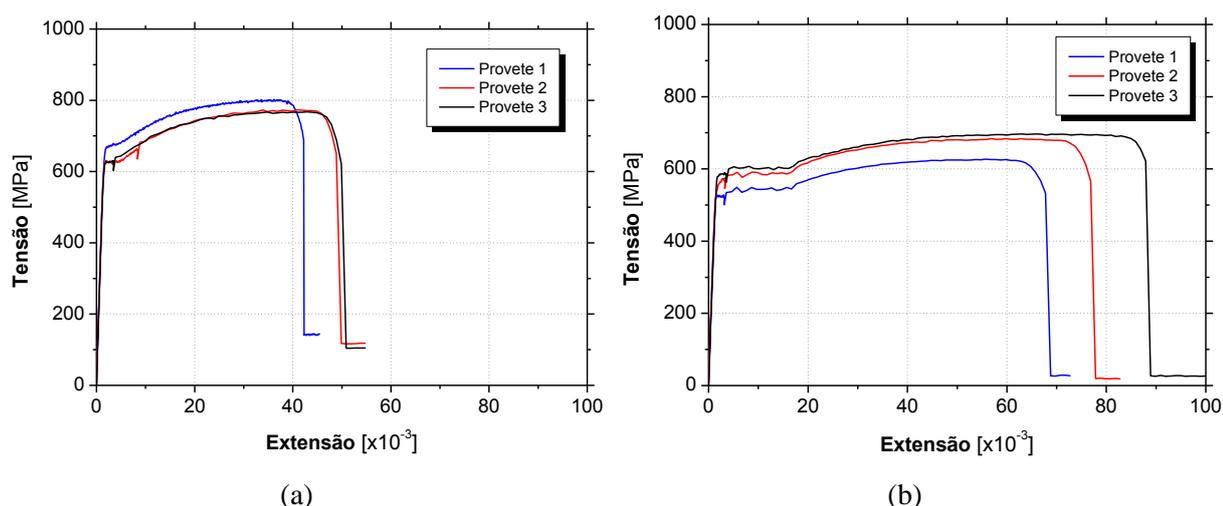


Figura 2.4 – Tensão vs. extensão para os varões de aço ensaiados: (a) diâmetro de 6 mm; (b) diâmetro de 8 mm.

Tabela 2.5 – Características mecânicas dos aços usados no presente programa de ensaios.

Varão	f_y [MPa]	f_u [MPa]
Ø6	631.61 (3.4 %)	781.03 (2.4 %)
Ø8	546.76 (5.3 %)	669.06 (5.6 %)

Nota: Os valores entre parênteses representam o coeficiente de variação (CoV).

2.4.3 Laminado de CFRP

No âmbito do presente trabalho usaram-se dois tipos de laminados de CFRP distintos, com distinta secção transversal: (i) $10 \times 1.4 \text{ mm}^2$ e (ii) $20 \times 1.4 \text{ mm}^2$. Estes laminados são produzidos pela S&P Clever Reinforcement Ibérica Lda., têm a designação comercial CFK 150/2000 e são fornecidos em rolos de 100 m de comprimento. A sua composição é à base de fibras de carbono, alinhadas segundo a direção longitudinal, e aglutinadas através de um adesivo vinilester, sendo a sua superfície lisa. A percentagem de fibras em relação à matriz é de cerca de 70%.

No âmbito do presente trabalho não se realizou a caracterização mecânica destes laminados, dado que os mesmos já tinham sido caracterizados no âmbito de outros trabalhos de investigação. Assim, na publicação Fernandes *et al.* (2015) é possível encontrar informação detalhada para o laminado com secção transversal de $10 \times 1.4 \text{ mm}^2$, enquanto no caso do laminado de secção $20 \times 1.4 \text{ mm}^2$ a informação encontra-se na publicação Sena-Cruz *et al.* (2013). Na Tabela 2.6 apresentam-se as principais características mecânicas destes laminados.

Tabela 2.6 – Propriedades resistentes dos laminados de CFRP usados no presente programa de ensaios.

Propriedade	Secção transversal do laminado (largura \times espessura) [mm^2]	
	$10 \times 1.4^{(1)}$	$20 \times 1.4^{(2)}$
Resistência à tração [MPa]	2648.3 (1.8%)	2784 (3.9%)
Módulo de elasticidade [GPa]	169.5 (2.5%)	161.8 (0.9%)
Extensão última [%]	1.6 (1.8%)	1.7 (3.0%)

Nota: Os valores entre parênteses representam o coeficiente de variação (CoV).

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

⁽²⁾ Dados extraídos de Sena-Cruz *et al.* (2013).

2.4.4 Adesivos

Os adesivos epoxídicos são correntemente usados em estruturas como forma de colagem estrutural. O estudo comparativo da presente investigação experimental envolve a utilização de três adesivos diferentes. Os adesivos 1 e 2 são de origem epoxídica e de baixa viscosidade, enquanto o adesivo 3 é um polímero de poliuretano com elevada viscosidade e baixo tempo de manuseio quando comparado com os outros dois. A seleção destes adesivos deve-se ao facto de terem vindo a ser usados no reforço de estruturas de betão armado com recurso a FRP. A Tabela 2.7 apresenta o nome comercial dos adesivos em estudo.

Todos os adesivos apresentam-se sob a forma dois componentes (Componente A - Resina e Componente B - endurecedor) que necessitam de ser misturados. No caso do adesivo 1 a proporção de mistura do componente A em relação ao componente B é de 3:1, para o adesivo 2 é 4:1, enquanto que no caso do adesivo 3 o fabricante indica que a razão da mistura deve ser de 9:1.

Tabela 2.7 – Designação definida para os adesivos usados no presente programa de ensaios.

Denominação adotada para o adesivo	Designação comercial
Adesivo 1	<i>Sikadur® 30</i>
Adesivo 2	<i>S&P Resin 220 epoxy adhesive®</i>
Adesivo 3	<i>Polymer PS</i>

A caracterização mecânica dos adesivos não foi realizada no âmbito da presente investigação experimental por, mais uma vez, esta já ter sido realizada no âmbito de investigações anteriores. Assim, de forma a obter as propriedades mecânicas dos adesivos 1 e 3 recorreu-se aos dados apresentados por Kwiecień (2012), enquanto no caso do adesivo 2 foram utilizadas as propriedades apresentadas por Fernandes *et al.* (2015). Os dados encontraram-se sistematizados na Tabela 2.8.

A partir dos resultados da Tabela 2.8 é possível concluir que os adesivos 1 e 2 tem propriedades mais próximas, enquanto o adesivo 3 apresenta características mecânicas significativamente inferiores às dos restantes.

Tabela 2.8 – Propriedades mecânicas dos adesivos usados no presente programa de ensaios.

Propriedade	Adesivo 1 ⁽¹⁾	Adesivo 2 ⁽²⁾	Adesivo 3 ⁽¹⁾
Resistência à tração [MPa]	28	22	2.2
Módulo de elasticidade [GPa]	12.8	7.15	0.008
Extensão máxima [%]	0.22	0.36	45

⁽¹⁾ Dados extraídos de Kwiecień (2012).

⁽²⁾ Dados extraídos de Fernandes *et al.* (2015).

2.5 Confeção e reforço dos provetes

As operações de fabrico e preparação dos elementos de betão para os estudos realizados foram efetuadas em duas fases. A primeira fase decorreu nas empresas Tecnipor e Artecanter e consistiu na produção dos provetes de betão e abertura dos respetivos entalhes, respetivamente. Na segunda fase, já nas instalações do LEST, foram efetuadas as operações de pré-fendilhação das faixas de laje, bem como a aplicação e cura dos reforços com laminados de CFRP. De salientar que dada a diversidade de provetes utilizados, algumas operações a seguir apresentadas não são comuns a todos os elementos de betão utilizados.

2.5.1 Betonagem e abertura de entalhes

Inicialmente foram produzidas as armaduras para colocação nas faixas de laje (ver Figura 2.5(a)), às quais posteriormente se aplicaram os extensómetros (ver Figura 2.5(b)). Ao mesmo tempo, foram preparadas as cofragens para todos os provetes a fabricar, bem como os moldes cilíndricos para caracterização mecânica do betão (ver Figura 2.5(c)). O passo seguinte consistiu na betonagem de todos os elementos de betão de uma só vez (ver Figura 2.5(d)). Após a cura do betão, procedeu-se à descofragem (ver Figura 2.5(e)) e transporte dos provetes de betão para efetuar a abertura dos entalhes através de um maquina de corte (ver Figura 2.5(f)).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 2.5 – Preparação dos provetes de betão: (a) produção das armaduras para as faixas de laje; (b) aplicação de extensómetros nas armaduras; (c) preparação das cofragens; (d) betonagem; (e) provetes após a descofragem; (f) abertura dos entalhes de reforço.

Por fim, de forma a remover poeiras e matérias provenientes do corte, procedeu-se à limpeza com jato de água antes do transporte para o LEST.

As dimensões médias dos entalhes foram avaliadas, encontrando-se Tabela 2.9 os resultados obtidos.

Tabela 2.9 – Dimensões médias dos entalhes para introdução do laminado de CFRP.

Dimensão	Provetes cúbicos		Provetes prismáticos	Faixas de laje
	Secção do entalhe [mm ²]		Secção do entalhe [mm ²]	Secção do entalhe [mm ²]
	5×15	5×25	5×25	5×25
Largura (w_g)	5.19 (3.2%)	5.32 (2.5%)	5.21 (7.3%)	--
Profundidade (d_g)	15.53 (2.2%)	25.38 (1.4%)	25.45 (2.2%)	--

Notas: os valores entre parênteses representam o coeficiente de variação (CoV); as dimensões médias apresentadas foram determinadas com recurso a medições efetuadas com um paquímetro, tendo sido efetuadas medições em vários pontos de cada um dos entalhes dos vários provetes. Posteriormente efetuaram-se as médias em profundidade e largura por tipo provete.

2.5.2 Aplicação do reforço

Antes da execução do reforço, foram efetuados alguns passos de forma a garantir a máxima qualidade no reforço aplicado. Os entalhes foram limpos com ar comprimido (ver Figura 2.6(a)). De forma a evitar a existência de adesivo nas zonas circundantes ao entalhe, esta zona foi isolada (ver Figura 2.6(b)). Foram também marcados os comprimentos de ancoragem dos laminados nos respetivos provetes.

Uma vez que o laminado de CFRP é disponibilizado pelo fabricante em rolos, foi necessário efetuar o seu corte com os respetivos comprimentos com auxílio de uma máquina de corte. Após o corte dos laminados, procedeu-se à sua preparação para aplicação no reforço. Assim, foram dados os seguintes passos:

- No caso dos provetes para os ensaios de arranque direto foram coladas pequenas chapas metálicas na extremidade do laminado que garantem a correta fixação da garra durante o ensaio (ver Figura 2.6(c)). De seguida foram colocados elementos de delimitação do comprimento de ancoragem (L_b): (i) revestimentos de plástico à volta do laminado de CFRP e do betão; (ii) peças de latex que garantem o correto posicionamento do

laminado no entalhe e impedem que o adesivo possa fluir para além do comprimento desejado (ver Figura 2.6(d));

- No caso das faixas de laje aplicaram-se extensómetros nos laminados de CFRP, após uma limpeza local com acetona (ver Figura 2.6(e));
- Por fim, em qualquer dos casos procedeu-se à limpeza dos laminados com acetona na sua totalidade.



(a)



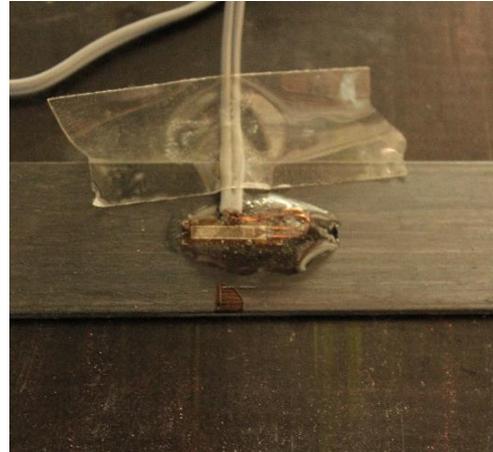
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 2.6 – Trabalhos preparatórios (antes da aplicação do reforço): (a) limpeza dos entalhes com ar comprimido; (b) isolamento das zonas próximas ao entalhe; (c) chapas metálicas; (d) aplicação de delimitadores do comprimento de ancoragem; (e) extensómetro já colocado no laminado.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 2.7 – Execução do reforço: (a) aplicação do primário (adesivo 3); (b) pesagem dos componentes A e B; (c) mistura dos dois componentes do adesivo; (d) aplicação do adesivo com espátula (adesivos 1 e 2). (e) aplicação do adesivo 3; (f) regularização da superfície do reforço com a espátula.

Por fim, os provetes foram pintados de modo a facilitar a eventual identificação das fendas (ver Figura 2.8(a)) e foi instalada a restante instrumentação aquando do respetivo ensaio. No caso

dos provetes usados nos ensaios de arranque direto, foi colocado um pequeno trecho de laminado na extremidade carregada de forma a fixar o batente para que o LVDT pudesse registar o deslizamento (ver Figura 2.8(b)). Por sua vez, e apenas no caso dos provetes prismáticos, adotou-se este procedimento também na extremidade livre.

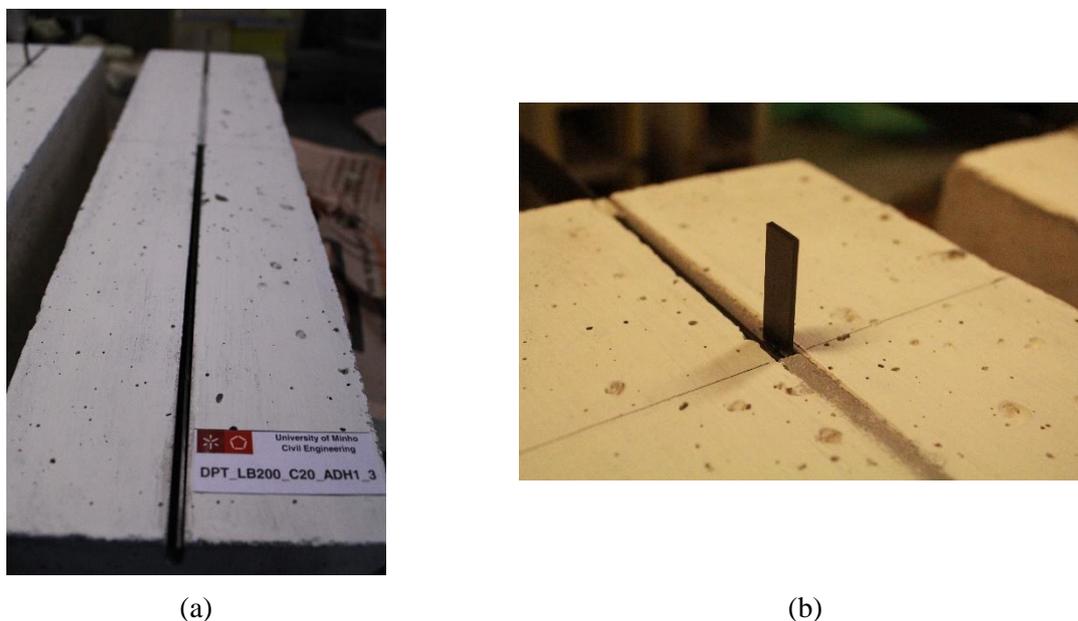


Figura 2.8 – Trabalhos preparatórios (antes do ensaio): (a) provete após pintura; (b) trecho de laminado para fixação do batente do LVDT.

2.5.3 Pré-fendilhação das faixas de laje

A pré-fendilhação foi efetuada em três faixas de laje previamente à aplicação do reforço. A configuração de ensaio utilizada para a aplicação da carga é a mesma do ensaio monotónico até à rotura destes elementos, já apresentada na Secção 2.3.2. A principal diferença reside no facto do ensaio ter sido realizado em controlo de força. O valor da carga de pré-fendilhação a aplicar foi estimado com recurso a um modelo numérico de cálculo de secções. Assim, foi aplicada uma carga de 15 kN, que de acordo com o modelo numérico corresponde a cerca de 2/3 da força máxima da faixa de laje de referência, com uma velocidade de 0.05 kN/s. Após atingido este valor de 15 kN, a carga permaneceu constante por um período de 10 minutos, com o objetivo de se proceder ao registo do padrão de fendilhação e medição da abertura de fendas. Finda esta tarefa, procedeu-se à descarga da faixa de laje.

Na Figura 2.9 apresentam-se as curvas que relacionam a força com o deslocamento vertical e extensões no aço a meio vão para as três faixas de laje nas quais se efetuaram as operações de pré-fendilhação (SL_ADH1_C, SL_ADH2_C e SL_ADH3_C). Adicionalmente, nestes gráficos incluem-se, também, os resultados relativos à faixa de laje de referência (SL_REF). Por questões de simplicidade, a designação adotada é mesma que a usada na presença do reforço.

Quanto à resposta das faixas de laje durante a aplicação da carga de pré-fendilhação revelou-se próxima da obtida no ensaio até à rotura da faixa de laje de referência. A principal diferença entre as duas respostas reside na existência de pequenas quedas da carga aplicada no caso do ensaio à rotura relacionadas com o processo de abertura de fenda, uma vez que este ensaio foi realizado em controlo de deslocamentos, ao contrário do ensaio de pré-fendilhação, realizado em controlo de força, em que o incremento da força é constante. Terminada a aplicação de carga, houve lugar à recuperação da deformação elástica, tendo-se observado uma flecha residual a meio vão da ordem dos 6 mm. Durante o tempo em que a carga permaneceu constante denotou-se um pequeno aumento da deformação vertical devido a efeitos de fluência (ver Figura 2.9(a)). Por outro lado, à semelhança da faixa de laje, o aço das armaduras inferiores não recuperou totalmente a sua extensão, tendo-se observado uma extensão residual de cerca de 1‰ (ver Figura 2.9(b)).

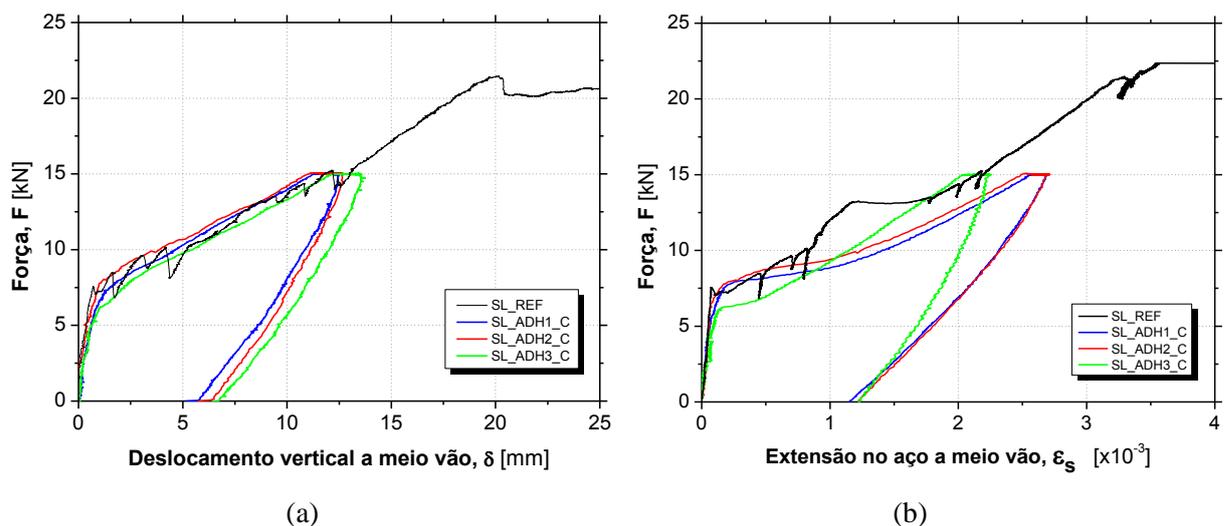


Figura 2.9 – Pré-fendilhação das faixas de laje: (a) força vs. deslocamento a meio vão; (b) força vs. extensão no aço a meio vão.

As fendas foram numeradas em cada faixa de laje na face lateral exposta durante o ensaio (ver Figura 2.3(d)) pela ordem geométrica que estas apresentam. Assim, a fenda I é a mais à esquerda de acordo com a posição em que a faixa de laje foi ensaiada (ver Figura 2.10).

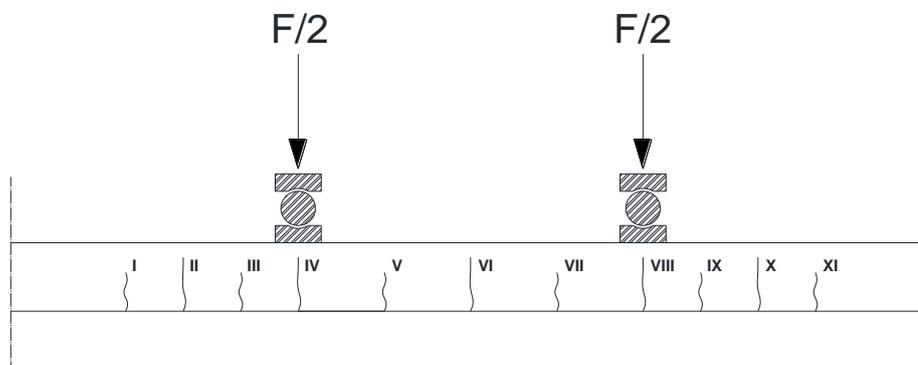


Figura 2.10 – Numeração adotada para as fendas resultantes da pré-fendilhação.

Durante o período em que a carga permaneceu constante foram também medidas as larguras das várias fendas (em vários pontos para cada fenda). Esta medição foi realizada com recurso a um microscópio manual, tendo sido usado um fator de ampliação de 20 \times . Na Figura 2.11 apresentam-se dois exemplos da medição da largura de fenda. Os resultados obtidos para a largura média de cada fenda encontram-se na Figura 2.12.

Analisando a Figura 2.12, conclui-se que existe uma tendência para as fendas com maior abertura se concentrarem na zona de flexão pura, diminuindo à medida que a distancia a esta zona aumenta, tal como seria de esperar. Este aspeto é mais notório nas faixas de laje SL_ADH2_C e SL_ADH3_C.

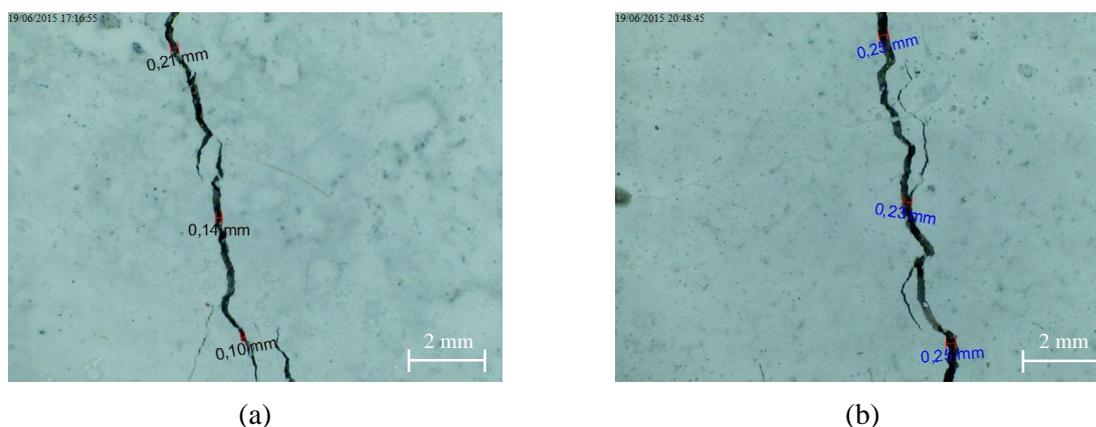
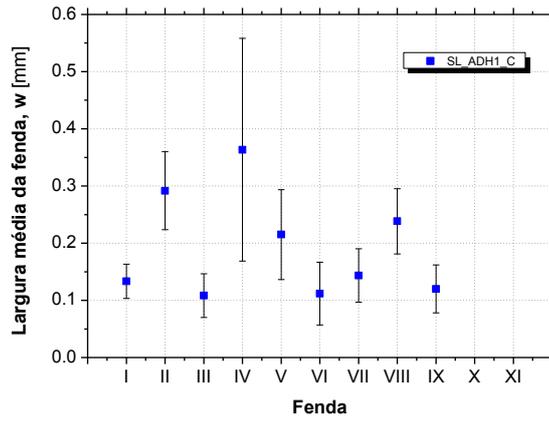
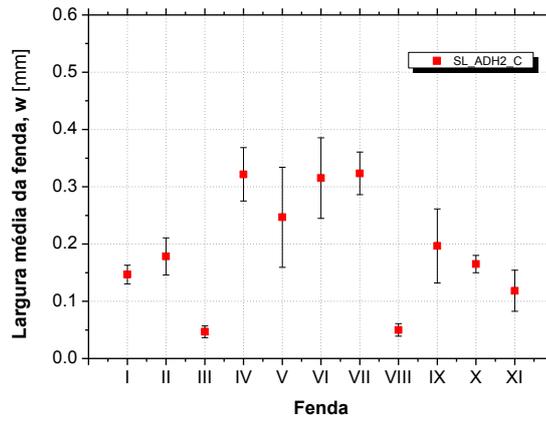


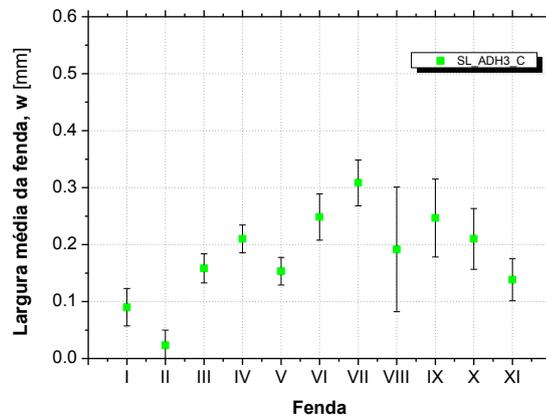
Figura 2.11 – Medição da largura de fenda: (a) fenda VII da faixa de laje SL_ADH1_C; (b) fenda IX da faixa de laje SL_ADH3_C.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.12 – Largura média das fendas resultantes da pré-fendilhação: (a) SL_ADH1_C; (b) SL_ADH2_C; (c) SL_ADH3_C.

CAPÍTULO 3

ENSAIOS DE ARRANQUE DIRETO: RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tendo em vista a caracterização do comportamento da ligação de laminados de CFRP ao betão segundo a técnica NSM (sistema NSM-CFRP), foi realizado um programa experimental. O estudo incidiu na avaliação do desempenho da ligação entre o laminado de CFRP e o betão utilizando diferentes adesivos, comprimentos de ancoragem e laminados de CFRP de diferentes secções transversais. A utilização de distintos comprimentos de ancoragem teve, também, como objetivo a determinação da força máxima mobilizável no CFRP para os distintos sistemas em estudo, sendo que, para laminados com maior secção transversal são necessários maiores comprimentos de ancoragem. Desta feita, foram realizados ensaios de arranque direto utilizando provetes cúbicos para menores comprimentos de ancoragem e provetes prismáticos para maiores comprimentos de ancoragem. O ensaio monotónico foi realizado sob controlo de deslocamento na extremidade carregada segundo a configuração apresentada no Capítulo 2. Tendo por base a instrumentação utilizada, foi possível obter a relação entre a força de arranque e o deslizamento ao longo de cada ensaio. Adicionalmente, em cinco dos ensaios realizados foi possível utilizar a técnica de instrumentação DIC (*Digital Image Correlation*), que permitiu identificar os mecanismos resistentes da ligação do sistema NSM-CFRP. Assim, com esta técnica de registo e análise de imagem foi possível estudar alguns factos que pela simples observação do provete é de todo impossível perceber, nomeadamente o campo de extensões evolutivas na zona exposta do adesivo e betão situado na vizinhança do comprimento de ancoragem.

Neste capítulo são então apresentados os resultados dos ensaios de arranque direto realizados, seguindo-se uma análise comparativa bem como a apresentação das principais ilações retiradas.

3.1 Resumo dos principais resultados obtidos

Nas secções seguintes são apresentados os dados mais importantes extraídos do programa de ensaios levado a cabo. Nas Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3 apresentam-se as principais entidades que caracterizam o comportamento da ligação para cada tipo de adesivo, respetivamente, 1, 2 e 3. Os valores apresentados correspondem à média dos valores obtidos para o conjunto dos provetes testados em cada caso, com exceção dos modos de rotura. A totalidade dos resultados

é apresentada no ANEXO I. Tal como referido no capítulo anterior, cada série é composta por três provetes. Contudo, durante a realização de alguns dos ensaios surgiram problemas técnicos, pelo que não foi possível incluir os três resultados. Nas referidas tabelas, F_{lmax} é a força máxima registada; F_{lmax}/F_{fu} representa a relação entre F_{lmax} e a força máxima que o laminado de CFRP é capaz de mobilizar num ensaio de tração uniaxial (F_{fu}); $\tau_{max,av1}$ é tensão tangencial média na interface laminado de CFRP/adesivo para F_{lmax} ; por sua vez, $\tau_{max,av2}$ corresponde à máxima tensão tangencial média na interface adesivo/betão. Estas tensões de corte são obtidas pela divisão da força de arranque de pico (F_{lmax}) pela área de contacto entre o laminado e o adesivo no primeiro caso ($\tau_{max,av1}$) e no segundo caso pela área de contacto entre o adesivo e o betão ($\tau_{max,av2}$) determinadas, respetivamente, através de $F_{lmax}/(2(w_f + t_f)L_b)$ e $F_{lmax}/(2(w_g + d_g)L_b)$, onde w_f e t_f representam, respetivamente, a largura e espessura do laminado de CFRP e w_g e d_g são, respetivamente, a largura e profundidade médias do entalhe (ver Capítulo 2); s_{lmax} e s_{fmax} representam, respetivamente, o deslizamento na extremidade carregada e livre, correspondentes à máxima força de arranque registada. De notar que nestas tabelas, os valores apresentados correspondem à média aritmética dos parâmetros acima descritos para os ensaios considerados como válidos.

Nas Figuras 3.1, 3.2, e 3.3 são apresentadas as curvas que relacionam a força de arranque com o deslizamento na extremidade carregada ($F_l - s_l$) para as diferentes séries ensaiadas. A análise destas respostas é efetuada na Secção 3.2 uma vez que existem vários aspetos comuns entre elas.

3.1.1 Adesivo 1

Analisando os valores obtidos para os provetes em que o adesivo 1 foi utilizado (ver Tabela 3.1), no caso de F_{lmax} a dispersão dos resultados é reduzida. Pelo contrário, s_{lmax} apresenta variação bastante mais elevada. Por sua vez, s_{fmax} é a entidade que maior variação apresenta entre provetes, provavelmente relacionada com o seu reduzido valor. Como seria de esperar, F_{lmax} aumenta com o aumento de L_b , enquanto $\tau_{max,av1}$ e $\tau_{max,av2}$ decrescem com o aumento deste valor, devido à distribuição não uniforme das tensões de corte ao longo de L_b . O valor de $\tau_{max,av1}$ é superior ao de $\tau_{max,av2}$, como não poderia deixar de ser, fruto da menor área de distribuição da força no primeiro caso. Os valores de L_b estudados com laminado L10 não

foram suficientes para provocar a rotura do laminado de CFRP, enquanto com o laminado L20, o valor de L_b capaz de provocar a rotura do laminado de CFRP estará entre 200 e 300 mm.

Tabela 3.1 – Valores médios para os principais parâmetros obtidos com o adesivo 1.

Provete	F_{lmax}	F_{lmax}/F_{fu}	$\tau_{max,av1}$	$\tau_{max,av2}$	s_{lmax}	s_{fmax}	MR		
	[kN]	[%]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[mm]	Provete		
							1	2	3
ADH1_L10_Lb60	22.49 (1.5%)	60.77 (1.5%)	16.44 (1.5%)	10.34 (1.5%)	0.50 (13.8%)	--	D	D	D
ADH1_L10_Lb80	25.97 (2.1%)	70.20 (2.1%)	14.24 (2.1%)	8.96 (2.1%)	0.68 (3.3%)	--	D	D	D
ADH1_L10_Lb100	29.57 (3.4%)	79.92 (3.4%)	12.97 (3.4%)	8.16 (3.4%)	0.93 (7.1%)	--	D	D	D
ADH1_L20_Lb80	46.69 (4.5%)	58.36 (4.5%)	13.63 (4.5%)	10.41 (4.5%)	0.50 (7.0%)	--	D	-	D
ADH1_L20_Lb100	48.91 (4.1%)	61.14 (4.1%)	11.43 (4.1%)	8.72 (4.1%)	0.64 (7.1%)	--	D	D	D
ADH1_L20_Lb200	59.53 (3.0%)	74.41 (3.0%)	6.95 (3.0%)	5.30 (3.0%)	1.10 (22.7%)	0.05 (32.2%)	D	F	-
ADH1_L20_Lb300	61.03 (2.6%)	76.28 (2.6%)	4.75 (2.6%)	3.63 (2.6%)	1.27 (17.2%)	0.01 (38.1%)	-	F	F

Notas: MR – Modos de rotura: D = Rotura por deslizamento do laminado de CFRP na interface laminado/adesivo F = Rotura do laminado de CFRP; os valores entre parênteses representam os coeficientes de variação (CoV).

A Figura 3.1 apresenta as curvas médias $F_l - s_l$ obtidas dos ensaios experimentais em que foi utilizado o adesivo 1. No caso da utilização do laminado L10, a resposta é similar para todos os valores de L_b até ao registo de F_{lmax} com a rigidez da ligação a evoluir de forma semelhante para todos. Nos casos em que o laminado L20 foi aplicado, a tendência verificada anteriormente é bastante menor, tendendo a rigidez da ligação a ser superior para os maiores valores de L_b . Embora em vários casos a rotura tenha ocorrido por deslizamento na interface laminado/adesivo (ver Tabela 3.1), apenas no caso do provete ADH_L10_Lb60 foi possível obter a resposta média do sistema na fase pós-pico.

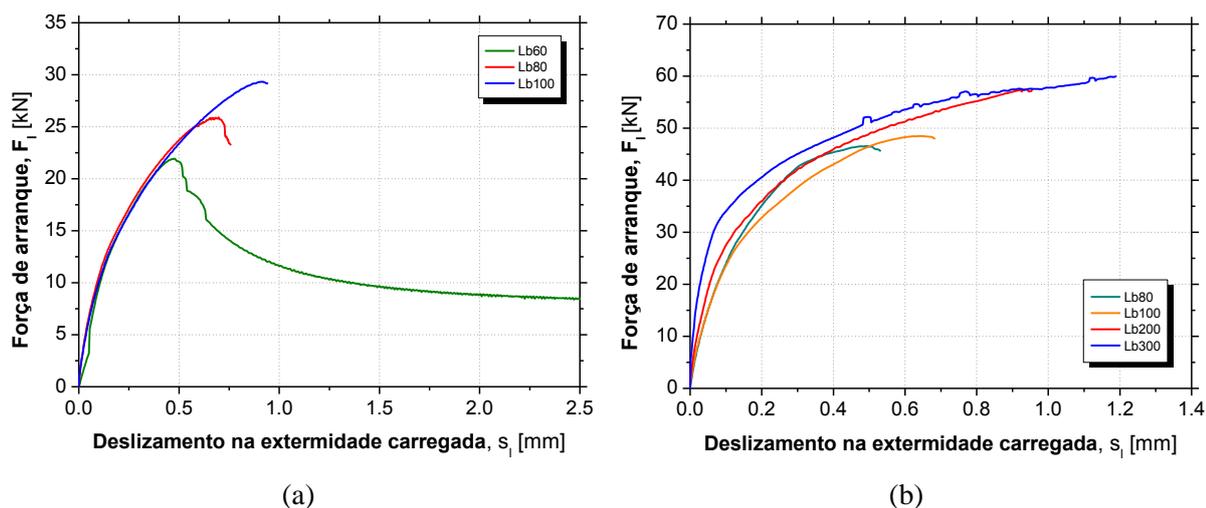


Figura 3.1 – Força de arranque vs. deslizamento na extremidade carregada (adesivo 1): (a) laminado L10 e (b) laminado L20.

3.1.2 Adesivo 2

À semelhança do observado para os dados dos provetes em que o adesivo 1 foi utilizado, em termos de F_{lmax} , a dispersão dos resultados é reduzida, sendo algo superior nos provetes com laminado L20 (ver Tabela 3.2). A variação de s_{lmax} é mais elevada, no entanto é bastante inferior à observada para s_{fmax} . Para L10, o valor de 80 mm de L_b foi suficiente para provocar a rotura do laminado de CFRP, enquanto com o laminado L20, o valor de L_b necessário para provocar a rotura do laminado de CFRP deverá estar compreendido entre 200 e 300 mm. Com o aumento de L_b , F_{lmax} volta a aumentar, enquanto $\tau_{max,av1}$ e $\tau_{max,av2}$ tendem a diminuir pelos motivos já anteriormente enunciados, exceção para o provete ADH2_L10. O valor de $\tau_{max,av1}$ é novamente superior ao de $\tau_{max,av2}$, como já foi explicado.

Na Figura 3.2 são apresentadas as curvas médias $F_l - s_l$ obtidas do ensaio dos provetes reforçados com o adesivo 2. Na fase inicial, a rigidez do sistema tende a ser superior para os maiores valores de L_b . Não foi possível obter a resposta na fase pós-pico em nenhum dos casos.

Tabela 3.2 – Valores médios para os principais parâmetros obtidos com o adesivo 2.

Provete	F_{lmax}	F_{lmax}/F_{fu}	$\tau_{max,av1}$	$\tau_{max,av2}$	s_{lmax}	s_{fmax}	MR		
	[kN]	[%]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[mm]	Provete		
							1	2	3
ADH2_L10_Lb60 ⁽¹⁾	24.25 (1.59%)	65.55 (1.59%)	17.73 (1.59%)	0.55 (11.35%)	24.25 (1.59%)	--	D	D	D
ADH2_L10_Lb80 ⁽¹⁾	36.52 (2.09%)	98.71 (2.09%)	20.02 (2.09%)	0.88 (2.15%)	36.52 (2.09%)	--	F	F	F
ADH2_L10_Lb100 ⁽¹⁾	35.60 (2.98%)	96.22 (2.98%)	15.61 (2.98%)	0.81 (10.98%)	35.60 (2.98%)	--	F	F	F
ADH2_L20_Lb80	48.40 (4.6%)	60.50 (4.6%)	14.13 (4.6%)	10.79 (4.6%)	0.48 (29.0%)	--	D	D	D
ADH2_L20_Lb100	54.06 (4.4%)	67.57 (4.4%)	12.63 (4.4%)	9.64 (4.4%)	0.75 (11.9%)	--	D	D	D
ADH2_L20_Lb200	55.19 (6.4%)	68.98 (6.4%)	6.45 (6.4%)	4.92 (6.4%)	0.88 (10.0%)	0.02 (136.6%)	-	D	F
ADH2_L20_Lb300	60.36 (3.4%)	75.45 (3.4%)	4.70 (3.4%)	3.59 (3.4%)	2.01 (17.7%)	0.02 (88.7%)	F+D	F+D	F

Notas: MR – Modos de rotura: D = Rotura por deslizamento do laminado de CFRP na interface laminado/adesivo
 F = Rotura do laminado de CFRP; os valores entre parênteses representam os coeficientes de variação (CoV).

⁽¹⁾ Resultados extraídos de Sena-Cruz *et al.* (2015b).

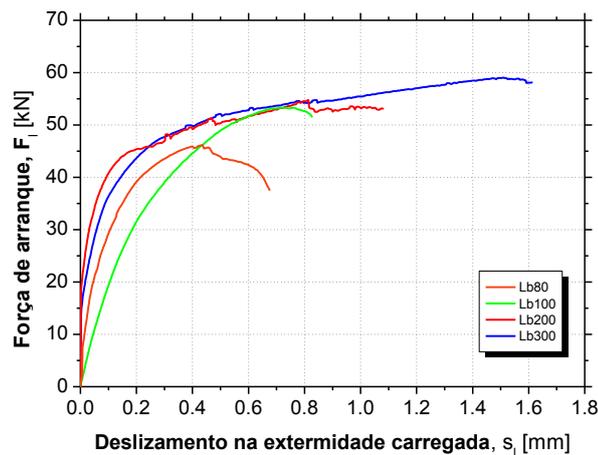


Figura 3.2 – Força de arranque vs. deslizamento na extremidade carregada com o adesivo 2 e laminado L20.

3.1.3 Adesivo 3

De acordo com os dados da Tabela 3.3, com a utilização do adesivo 3, houve também lugar ao aumento de F_{lmax} para os sucessivos valores crescentes de L_b . A dispersão dos resultados é algo superior quando comparada com os dois casos anteriores, provavelmente relacionada com uma menor homogeneidade do adesivo 3 comparativamente com os dois restantes. Os valores de s_{lmax} apresentam variações algo elevadas também. Ao contrário do que se verificou nos dois

casos anteriores, $\tau_{\max,av1}$ e $\tau_{\max,av2}$ aumentam com o incremento de L_b . Os valores de L_b testados com este adesivo foram curtos, pelo que não existiu rotura do laminado de CFRP em nenhum dos casos. Para este adesivo os comprimentos de 200 e 300 mm não foram testados no âmbito da presente dissertação, o que impossibilita a realização de algumas comparações assim como a retirada de algumas conclusões.

Tabela 3.3 – Valores médios para os principais parâmetros obtidos com o adesivo 3.

Provete	F_{lmax}	F_{lmax}/F_{fu}	$\tau_{\max,av1}$	$\tau_{\max,av2}$	s_{lmax}	s_{fmax}	MR		
	[kN]	[%]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[mm]	Provete		
							1	2	3
ADH3_L10_Lb50	2.35 (6.0%)	6.34 (6.0%)	2.06 (6.0%)	1.29 (6.0%)	1.12 (11.2%)	--	D	D	D
ADH3_L10_Lb100	5.03 (6.9%)	13.59 (6.9%)	2.21 (6.9%)	1.39 (6.9%)	1.33 (14.7%)	--	D	D	D
ADH3_L10_Lb150	8.12 (6.3%)	21.95 (6.3%)	2.38 (6.3%)	1.49 (6.3%)	1.71 (2.9%)	--	D	D	D
ADH3_L20_Lb80	5.71 (11.8%)	7.14 (11.8%)	1.67 (11.8%)	1.27 (11.8%)	1.88 (7.4%)	--	D	D	D
ADH3_L20_Lb100	9.89 (0.5%)	12.36 (0.5%)	2.31 (0.5%)	1.76 (0.5%)	2.11 (4.0%)	--	D	-	D

Notas: MR – Modos de rotura; D = Rotura por deslizamento do laminado de CFRP na interface laminado/adesivo associada à remoção de uma fina camada de adesivo presente na superfície do laminado de CFRP; os valores entre parênteses representam os coeficientes de variação (CoV).

Na Figura 3.3 são apresentadas as curvas médias $F_l - s_l$ obtidas experimentalmente nos provetes em que o adesivo 3 foi utilizado. Nestes ensaios foi obtida a resposta quer na fase pré-pico quer no pós-pico para todos os provetes.

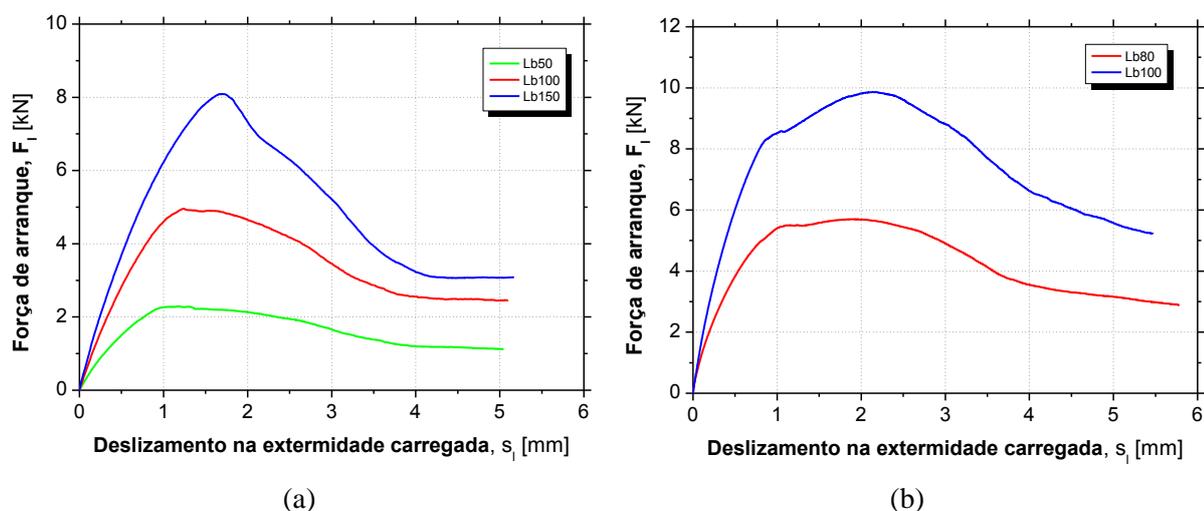


Figura 3.3 – Força de arranque vs. deslizamento na extremidade carregada (adesivo 3): (a) laminado L10 e (b) laminado L20.

3.2 Evolução da força de arranque e dos deslizamentos

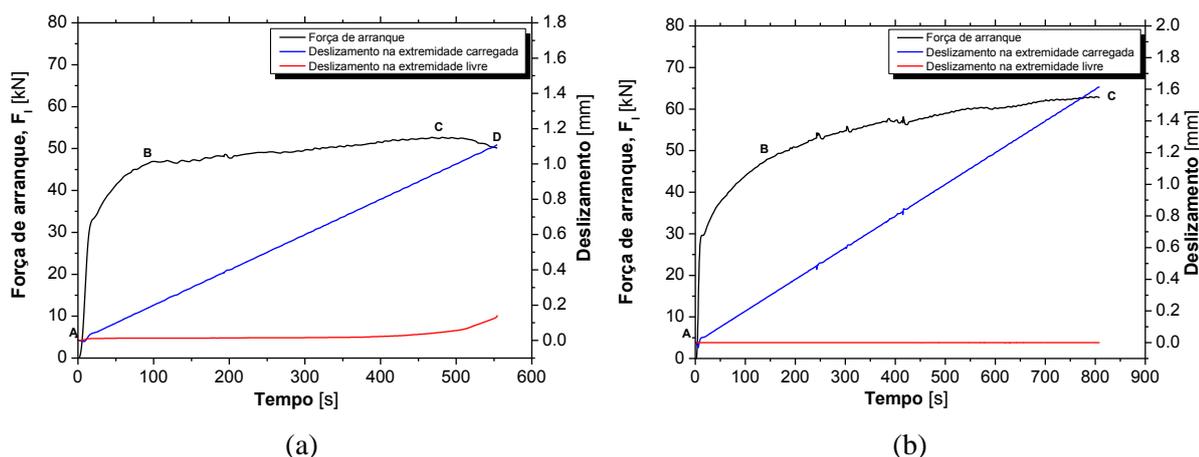
Nesta secção é efetuada a análise do comportamento experimental obtido para os provetes utilizados nos ensaios de arranque direto. Esta análise é efetuada em conjunto uma vez que existem vários aspetos comuns a todas as curvas, o que simplifica a análise.

No caso dos provetes ADH1 e ADH2, à exceção daqueles em que L_b toma valores de 200 e 300 mm, as curvas $F_l - s_l$ (ver Figuras 3.1 e 3.2) são idênticas às obtidas noutros estudos reportados na literatura (e. g. Sena-Cruz (2005) e Fernandes *et al.* (2015)). Assim, para os casos citados, a resposta desde a origem até F_{lmax} é essencialmente não linear, o que pode ser justificado pelo comportamento não linear do adesivo bem como pelo processo de descolagem do laminado devido à perda de aderência na interface laminado/adesivo. Após a máxima carga, é notório um pequeno ramo descendente (exceto no caso do provete ADH1_L10_Lb60 em que a resposta na fase de pós-pico foi obtida na totalidade) relacionado com o modo de rotura observado: deslizamento na interface laminado/adesivo, ou seja, o sistema NSM-CFRP não foi capaz de desenvolver uma resistência que permitisse obter a rotura pelo laminado de CFRP.

Quanto à resposta $F_l - s_l$ obtida nos ensaios realizados nos provetes ADH1 e ADH2 com valores de L_b de 200 e 300 mm foi diferente do observado até então. A fase inicial é semelhante aos casos do parágrafo anterior (i.e. até F_{lmax} das curvas $F_l - s_l$ obtidas com valores de L_b iguais ou inferiores a 100 mm), no entanto, a fase seguinte é completamente distinta. Em vez de existir a queda de F_l , há lugar ao aparecimento de um ramo aproximadamente linear, em que F_l aumenta de forma bastante reduzida. A extensão deste ramo é proporcional ao valor de L_b (ver Figuras 3.1 (b) e 3.2(a)). Durante esta fase, em alguns casos, houve também lugar à perda de secção transversal do laminado de CFRP.

A Figura 3.4 pretende ilustrar o comportamento supracitado. São apresentados dois exemplos (casos específicos, que nem sempre refletem o comportamento médio da série), um em que a rotura ocorreu por deslizamento na interface laminado/adesivo (ADH2_L20_Lb200_2) e outro em que a rotura se deu pelo laminado de CFRP (ADH2_L20_Lb300_3). Assim, o deslizamento na extremidade carregada aumenta a uma taxa constante, como já era de esperar, enquanto o deslizamento na extremidade livre é diferente nos dois casos apresentados. No provete ADH2_L20_Lb200_2 sofre um incremento numa fase já próxima da rotura por deslizamento do laminado de CFRP, enquanto no provete ADH2_L20_Lb300_3 não chega existir

deslizamento na extremidade livre. Quanto à evolução de F_l , como já foi dito, a partir do ponto assinalado com a letra B, a força de arranque praticamente não aumenta. No caso em que existe rotura por deslizamento do laminado de CFRP, F_l aumenta até ao ponto C da Figura 3.4, decrescendo a partir do momento em que o deslizamento na extremidade carregada começa a aumentar. No caso em que ocorre rotura se dá pelo laminado de CFRP, o deslizamento na extremidade livre é aparentemente nulo.



Nota: o número “_X” na designação dos provetes significa provete número X desta configuração testada.

Figura 3.4 – Evolução do deslizamento nas extremidades carregada e livre e força de arranque nos provetes ADH2_L20_Lb200_2 (a) e ADH2_L20_Lb300_3.

Na publicação Coelho *et al.* (2015), os autores referem que para a mobilização da lei tensão de corte *versus* deslizamento ser total é necessário um valor mínimo de L_b . A justificação para o comportamento descrito nos dois parágrafos anteriores (curvas $F_l - s_l$ referentes aos provetes com L_b de 200 e 300 mm) pode residir no facto de numa primeira fase ser mobilizado esse valor mínimo de L_b , não sendo a resistência desenvolvida suficiente para provocar rotura do laminado de CFRP, já que aderência entre os materiais não é suficiente para tal. Assim, nesta fase do ensaio, a zona próxima à extremidade carregada começa a ficar “descolada”, existindo a migração da zona de maior solicitação da ligação (tensão de corte máxima) para o L_b extra (ver Figura 3.5). Refira-se que este aspeto foi também mencionado em Coelho *et al.* (2015). Ao contrário do que acontece para valores de L_b de 80 e 100 mm, a margem de migração com L_b de 200 e 300 mm é muito maior, não existindo a rotura prematura por deslizamento do laminado de CFRP. Se o conjunto das tensões de corte ao longo da ligação, resultantes quer das zonas em fase de amolecimento, quer da zona em que se encontram as máximas tensões de corte, for suficiente para desenvolver uma carga capaz de provocar a rotura do laminado, então a rotura

dá-se pelo laminado de CFRP (em alguns casos favorecida pelo facto do laminado de CFRP já se encontrar com perda de secção transversal), caso contrário, a rotura do provete verifica-se por deslizamento na interface laminado/adetivo.

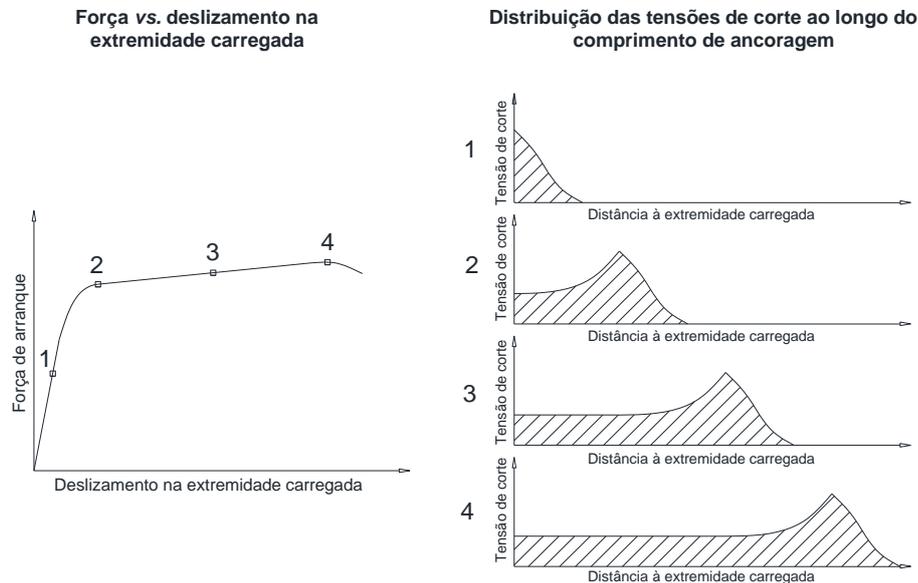


Figura 3.5 – Esquema genérico da possível distribuição das tensões de corte ao longo do comprimento de aderência durante o ensaio.

Quanto à resposta obtida nos provetes ADH3, tende a apresentar um tramo inicial praticamente linear, provavelmente relacionado com a mobilização total do adesivo dado o seu baixo módulo de elasticidade, ao contrário do que acontece com os adesivos 1 e 2. De salientar que em termos de rigidez inicial da ligação, i.e., até ao registo de F_{lmax} é notório o aumento do seu valor com o aumento de L_b .

F_{lmax} é atingida provavelmente no momento em que a capacidade de deformação elástica do adesivo atinge o seu máximo, iniciando-se a rotura por deslizamento na interface laminado adesivo e consequente queda de F_l . À exceção do provete ADH3_L10_Lb150 tende a existir um patamar alargado em que F_l mantem-se aproximadamente constante antes da queda para valores residuais. Esta carga residual deve-se aos mecanismos friccionais mobilizados ao nível da interface laminado de CFRP/adetivo (o que acontece também no provete ADH1_L10_Lb60), aspeto já amplamente descrito na literatura (e.g. Sena-Cruz (2005)). Observa-se, sobretudo para L10, que a força residual é tanto maior quanto maior for L_b , tal como observado no estudo realizado por Peng *et al.* (2015).

Contrariamente à técnica EBR, em que após o destacamento do sistema de reforço as tensões de corte entre o FRP e o betão tendem abruptamente para zero, na técnica NSM, o efeito de confinamento promovido pelas faces da ranhura conjuntamente com os mecanismos de fricção FRP/adesivo, explicam o elevado valor da resistência residual e o aumento desta com o comprimento de ancoragem.

3.3 Modos de rotura

Para o programa experimental realizado foram observados fundamentalmente dois modos distintos de rotura nos provetes (ver Figura 3.6), diretamente relacionados com as propriedades mecânicas dos três tipos de adesivos estudados. Nos provetes em que os adesivos 1 e 2 foram usados, a rotura deu-se: (i) por deslizamento ao nível da interface laminado de CFRP/adesivo (ver Figura 3.6(a)) ou (ii) por rotura do laminado de CFRP (ver Figura 3.6(b)). Por sua vez, nos provetes em que foi usado o adesivo 3, a rotura ocorreu por deslizamento na vizinhança da interface laminado de CFRP/adesivo (ver Figura 3.6(c)). De facto, nestes casos o laminado de CFRP vinha sempre acompanhado de adesivo, indiciando que a rotura possa ter sido coesiva no adesivo, mas na vizinhança da interface supracitada, como se ilustra na Figura 3.6(d).

Analisando os modos de rotura apresentados nas Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3, no caso do reforço com os adesivos 1 e 2, para menores comprimentos de ancoragem (até 100 mm), apenas o adesivo 2 consegue ser capaz de mobilizar a resistência total do laminado de CFRP com secção transversal $10 \times 1.4 \text{ mm}^2$ (L10). Para os restantes casos (séries ADH1_L20 e ADH2_L20), apenas se mobilizou parcialmente a resistência do laminado de CFRP. Com valores de L_b de 200 mm inclusive e com o laminado L20 em alguns dos provetes ensaiados houve rotura do laminado, mas em outros não. Assim, não é claro que este comprimento permita tal rotura. Nas séries ADH1_L20_Lb300 a rotura pelo laminado de CFRP é clara dado que este foi o modo de rotura predominante, logo o valor de L_b necessário para romper o laminado de CFRP dever-se-á situar entre 200 e 300 mm. Quanto à série ADH2_L20_Lb300, a rotura pelo laminado de CFRP não foi o único modo de rotura, pelo que não se pode concluir que o L_b de 300 mm seja suficiente para romper o laminado. Perante os factos expostos, sobretudo nas séries ADH2_L10 e ADH1_L20, com o aumento do valor de L_b , os modos de rotura tendem a evoluir desde o deslizamento do laminado de CFRP para a rotura deste, tal como descrito na literatura (e.g. Peng *et al.* (2015)).

Nas séries ADH3, quer para o laminado L10, quer para o laminado L20, não foi possível determinar qual o valor de L_b que permite desenvolver uma resistência capaz de levar o laminado até à rotura, ocorrendo sempre deslizamento na interface entre o laminado e o adesivo com remoção de uma fina camada de adesivo agregada ao laminado.



(a)



(b)



(c)



(d)

Nota: as figuras (a) e (c) foram obtidas através de um microscópio eletrónico com ampliação de 20 \times .

Figura 3.6 – Modos de rotura: (a) deslizamento do laminado de CFRP (adesivos 1 e 2); (b) rotura do laminado de CFRP (adesivos 1 e 2); (c) deslizamento do laminado (adesivo 3); (d) aspeto da interface adesivo/laminado após extração do laminado (adesivo 3).

Fenómenos de rotura no adesivo, na interface adesivo/betão ou no betão circundante ao entalhe como os descritos na revisão bibliográfica efetuada por Coelho *et al.* (2015) não foram notados nos estudos do presente programa experimental. Por outro lado, não foi visível fendilhação no betão envolvente do entalhe, nem mesmo numa procura com o microscópio eletrónico.

3.4 Análise das variáveis de estudo

Tendo por base os resultados indicados nas Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3, na Figura 3.7 apresenta-se a influência diferentes variáveis de estudo na força máxima de arranque (F_{lmax}), no deslizamento na extremidade carregada (s_{lmax}), na máxima tensão tangencial média ($\tau_{max,av1}$) e o rácio F_{lmax}/F_{fu} , para os diferentes comprimentos de ancoragem (L_b) estudados.

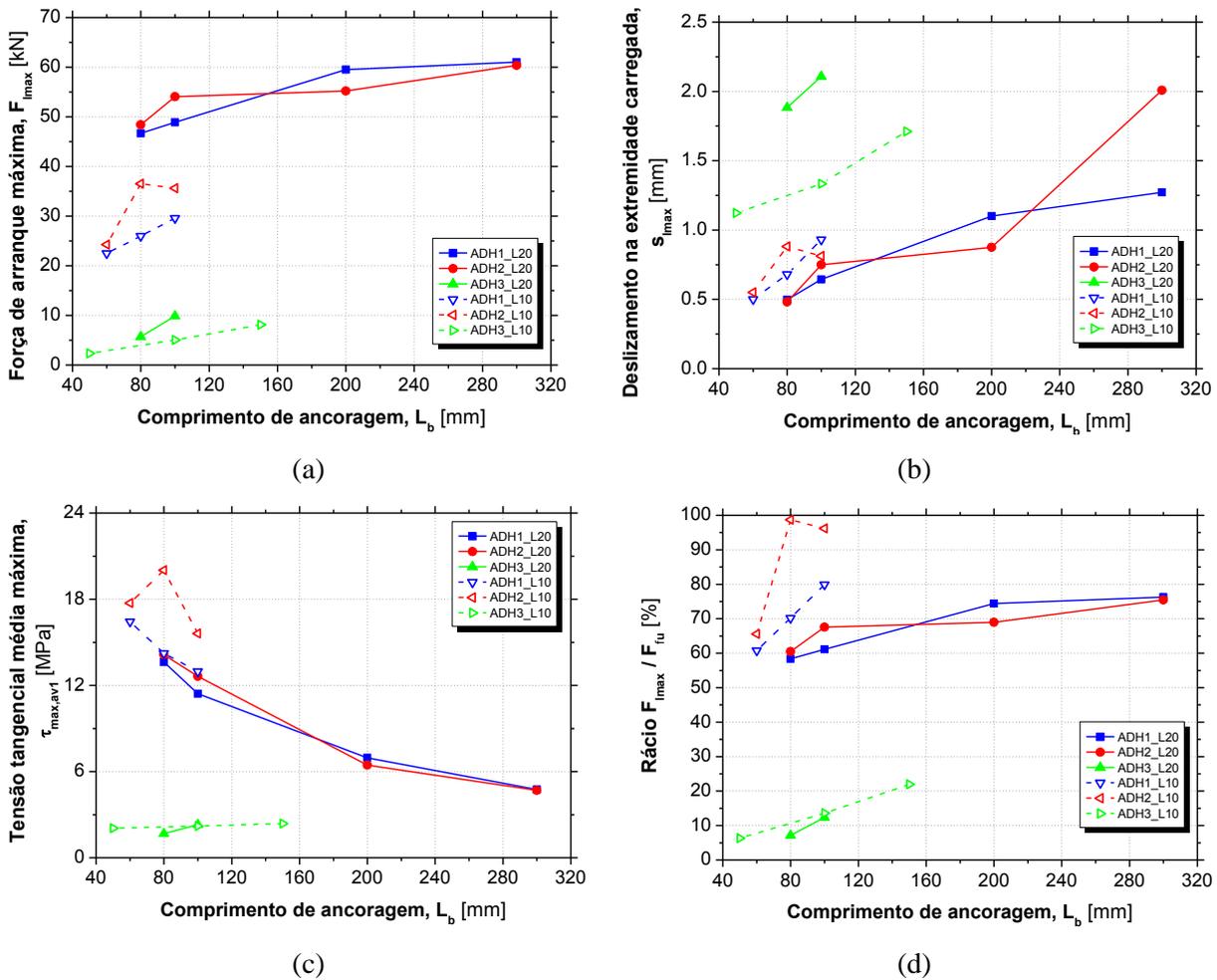


Figura 3.7 – Influência das variáveis de estudo: (a) na força máxima; (b) no deslizamento na extremidade carregada para a força de arranque máxima; (c) na tensão tangencial máxima na interface adesivo/laminado; (d) na razão entre a máxima força e a resistência máxima do laminado.

3.4.1 Força de arranque máxima

A força de arranque máxima (F_{lmax}) é apresentada na Figura 3.7(a). Tal como esperado, com o aumento do comprimento de ancoragem (L_b) existe uma tendência para F_{lmax} aumentar de uma forma aproximadamente linear. Este aumento é justificado principalmente pela resistência

residual que o sistema NSM-CFRP desenvolve, como é explicado na Secção 3.2. Esta tendência de aumento esgota-se quando o laminado de CFRP atinge a sua capacidade máxima (F_{fu}), nomeadamente nas séries L10 com comprimentos de ancoragem $L_b = 80$ e 100 mm e para as séries L20 com $L_b = 200$ e 300 mm.

Tal como seria de esperar, F_{lmax} foi maior nas séries L20 quando comparadas com as séries L10. Esta afirmação pode ser comprovada, p.e. para $L_b = 80$ mm onde para os laminados de CFRP com secção transversal de 10×1.4 mm² (séries L10) F_{lmax} atingiu um valor máximo de cerca de 37 kN, enquanto que para o caso de laminados de CFRP com secção transversal de 20×1.4 mm² (séries L20) este valor foi sempre superior a 45 kN (ver Figura 3.7(a)). Este comportamento é justificado pela maior capacidade de transmissão de cargas entre o laminado e o betão, por intermédio do adesivo, em virtude das maiores áreas de contacto nas interfaces laminado/adesivo e adesivo/betão.

De uma forma geral o adesivo 2 proporciona valores de F_{lmax} ligeiramente mais elevados, quando comparados com os resultados que se obtém quando o adesivo 1 é usado, independentemente do tipo de laminado usado. Este comportamento poderá eventualmente ser explicado pelo facto de o adesivo 2 ser produzido pelo mesmo fabricante dos laminados de CFRP. No caso da utilização do adesivo 3, F_{lmax} apresenta valores substancialmente menores. A título de exemplo para a série L20_Lb80, a força de arranque máxima obtida quando o adesivo 3 é usado corresponde a 12% do valor médio obtido quando são usados os adesivos 1 e 2. Uma possível explicação para a melhor performance do adesivo 2 poderá estar associada ao facto deste adesivo ser produzido pelo mesmo fabricante dos laminados de CFRP usados no âmbito da presente dissertação. Por outro lado, a fraca performance do adesivo 3 poderá estar associada às fracas características mecânicas que este apresenta.

3.4.2 Deslizamento na extremidade carregada para a força de arranque máxima

A partir da Figura 3.7(b) é possível de observar o aumento do deslizamento na extremidade carregada para a máxima força de arranque (s_{lmax}) com o aumento do valor de L_b . Exceção, mais uma vez, para o provete ADH2_L10 em que existe um aparente decréscimo na passagem do comprimento de ancoragem de 80 para 100 mm. Contudo, será de salientar que para estas

séries (ADH2_L10_Lb80 e ADH2_L10_Lb100) ocorreu a rotura do laminado de CFRP, devendo-se este aparente comportamento estranho à eventual dispersão de resultados.

No que respeita à influência da secção transversal do laminado nos valores de s_{lmax} , na presença de comprimentos de aderência de 80 e 100 mm, no caso dos adesivos 1 e 2, este valor tende a ser maior com o laminado de menor secção transversal (L10). Contrariamente, no caso do adesivo 3, o laminado de secção transversal $20 \times 1.4 \text{ mm}^2$ (L20) é o que tende a ter maiores valores de s_{lmax} , nomeadamente com L_b de 100 mm.

3.4.3 Tensão tangencial média para a máxima força de arranque

A Figura 3.7(c) apresenta as tensões tangenciais médias na interface adesivo/laminado ($\tau_{max,av1}$) no momento do registo da força máxima (F_{lmax}). Com exceção dos provetes relativos ao adesivo 3 e dos provetes do adesivo 2 com laminado de CFRP de 10 mm de largura (L10), a tendência é de diminuição de $\tau_{max,av1}$ com o aumento do comprimento de ancoragem. Esta observação permite concluir que a evolução de F_{lmax} não é proporcional ao aumento da área de contacto entre o laminado de CFRP e o adesivo. De facto a diminuição de $\tau_{max,av1}$ deve-se ao facto de com o aumento de L_b serem mobilizadas maiores áreas de contacto entre o laminado de CFRP e o adesivo, bem como devido ao facto da distribuição das tensões de corte ao longo do comprimento de ancoragem ser não uniforme (Coelho *et al.*, 2015). No caso das séries com recurso ao adesivo 3, com o aumento do comprimento de ancoragem verifica-se um ligeiro aumento de $\tau_{max,av1}$ para os comprimentos ensaiados. Este facto pode advir de uma distribuição mais uniforme das tensões ao longo do comprimento de ancoragem devido ao baixo módulo de elasticidade deste adesivo quando comparado com os dois restantes.

Os valores de $\tau_{max,av1}$ tendem a ser pouco influenciados pelas dimensões da secção transversal do laminado de CFRP. Para os diferentes adesivos estudados no presente programa experimental e ao longo dos vários valores de L_b , a tendência é a de $\tau_{max,av1}$ apresentar valores bastante próximos, quer para o laminado L10, quer para o laminado L20. Assim, aparentemente, o desenvolvimento das tensões de corte não é influenciado pela geometria da secção, no caso dos laminados de CFRP estudados.

Quanto à influência do tipo de adesivo, no caso das series ADH1_L20 e ADH2_L20 verifica-se uma tendência para os valores de $\tau_{\max,av1}$ serem bastante similares para os vários comprimentos testados. Contudo, os valores de $\tau_{\max,av1}$ que o adesivo 3 é capaz de desenvolver são bastante inferiores, o que revela menor capacidade de transferência tensões entre o laminado de CFRP e o betão.

3.4.4 Eficácia do sistema de reforço

Na Figura 3.7(d) é apresentada a evolução da eficácia do sistema de reforço materializada através do rácio $F_{l\max}/F_{fu}$ com o comprimento de ancoragem. Tal como seria de esperar, de uma forma geral maiores comprimentos de ancoragem proporcionam uma maior mobilização das capacidades dos laminados de CFRP.

Comparando as duas secções transversais em estudo (L10 *versus* L20), o L10 nos comprimentos de ancoragem comuns (80 e 100 mm) é o mais eficaz. Para mobilizar as propriedades resistentes do laminado de 20 mm de largura (L20) seriam necessários maiores comprimentos. No entanto, no caso dos adesivos 1 e 2 em que os comprimentos adotados foram, em alguns provetes, suficientes para levar o laminado até à rotura verificaram-se percentagens de eficiência de cerca de 75% no caso de L_b com valor de 300 mm, valores algo inferiores aos desejáveis. Este facto poder-se-á dever, entre outros, à perda gradual de secção transversal do laminado verificada durante o ensaio.

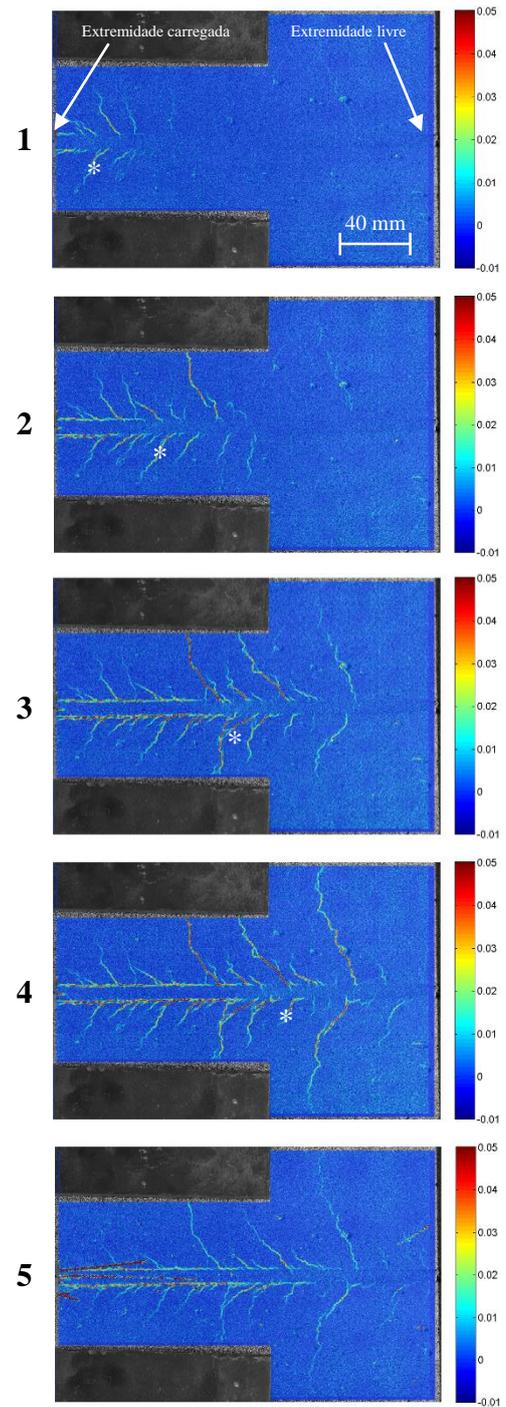
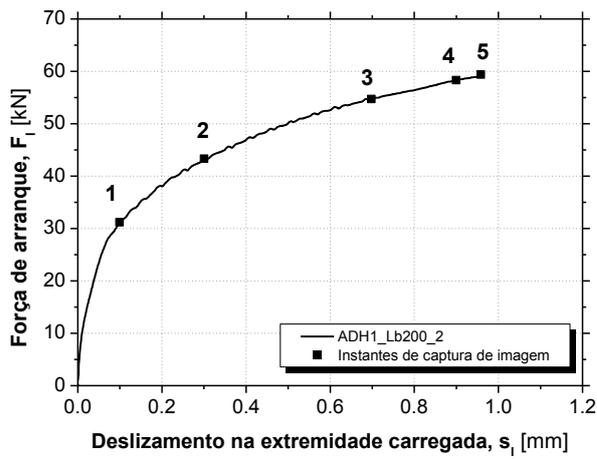
O provete ADH2_L10 é aquele que melhor permite explorar as capacidades resistentes do laminado. Para o comprimento de 80 mm a máxima carga que foi aplicada no laminado de CFRP foi bastante próxima da registada no ensaio de tração uniaxial. Ainda com o laminado L10, observa-se que o uso do adesivo 1 conduz a soluções menos eficazes do que com o uso do adesivo 2. Por sua vez, o adesivo 3 é aquele que menor desempenho apresenta sendo a percentagem de resistência última do laminado mobilizada bastante inferior à dos outros dois adesivos em estudo.

3.5 Ensaios realizados com DIC

Nos últimos anos tem-se assistido a um aumento do uso da correlação digital de imagem (DIC) na experimentação (e.g. Pereira *et al.* (2012) e Garzón-Roca *et al.* (2015)). Este método permite avaliar a evolução do campo de deslocamentos de um elemento estrutural, bem como as suas extensões, durante a realização de um ensaio. O método utiliza a comparação de duas imagens digitais da superfície de um objeto, antes de depois da sua deformação utilizando uma técnica de correlação apropriada (Chu *et al.*, 1985). Assim, é possível avaliar as diferenças e desta forma efetuar as medições pretendidas. No âmbito da presente dissertação e para um conjunto de provetes pré-selecionados foi usada o DIC durante a realização dos ensaios. Esta monitorização foi assistida pelo Professor Eduardo Pereira, docente do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho e especialista nesta técnica.

3.5.1 Resultados obtidos

No âmbito da presente dissertação, os provetes selecionados instrumentados com o DIC foram os seguintes: (i) ADH1_L20_Lb200_2; (ii) ADH2_L20_Lb100_1; (iii) ADH2_L20_Lb200_1; (iv) ADH2_L20_Lb300_1; (v) ADH3_L20_Lb100_1. Assim, não só foi possível analisar cada um dos provetes separadamente, como também efetuar as seguintes comparações: (i) L_b de 100 mm utilizando os adesivos 1 e 3; (ii) L_b de 200 mm utilizando os adesivos 1 e 2; e, (iii) influência do valor de L_b (100, 200 e 300 mm) no caso da utilização do adesivo 2. Da Figura 3.8 até à Figura 3.12 são apresentadas, para cada provete em que a metodologia DIC foi utilizada, as imagens obtidas em termos de extensões principais de tração, bem como os instantes de obtenção dessas imagens nas curvas $F_l - s_l$. Nestas curvas, o último instante de captura assinalado (instante 5 ou 6 dependendo do caso) corresponde à última imagem capturada após a rotura.

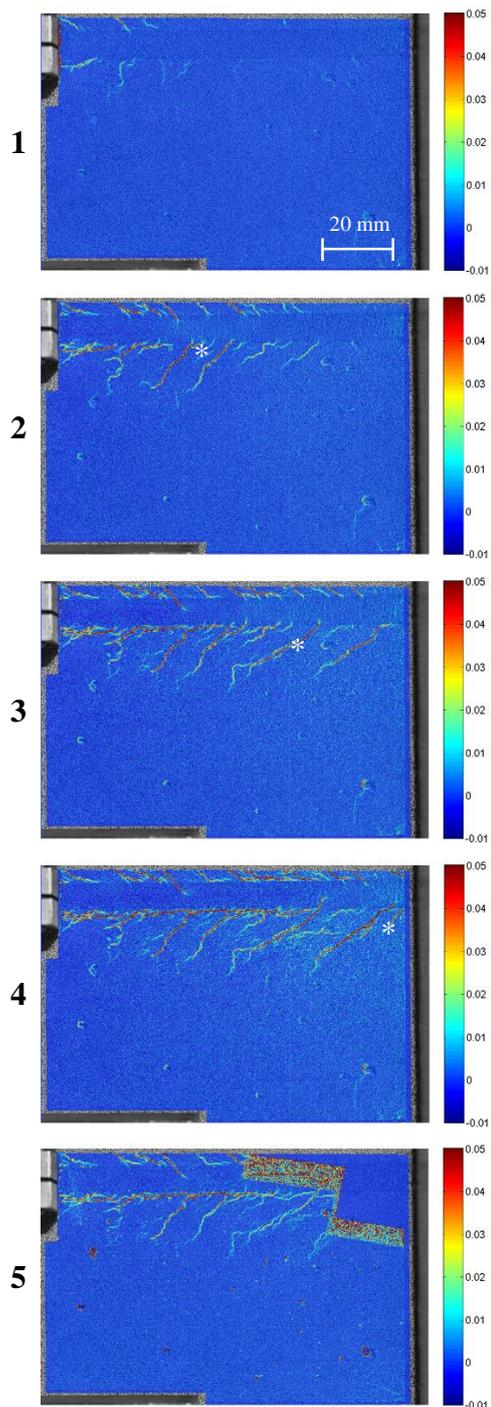
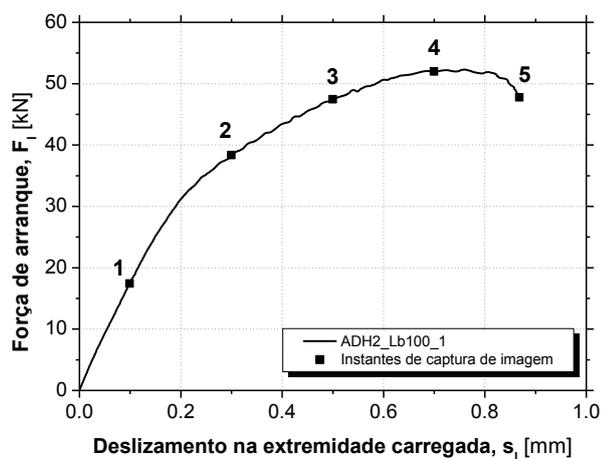


(a)

(b)

Notas: as extensões encontram-se em valor absoluto; o símbolo (*) localiza a zona onde provavelmente se encontra a tensão de corte máxima (local).

Figura 3.8 – Provete ADH1_L20_Lb200_2: (a) relação F_l versus s_l ; (b) a evolução das extensões principais de tração durante o ensaio.

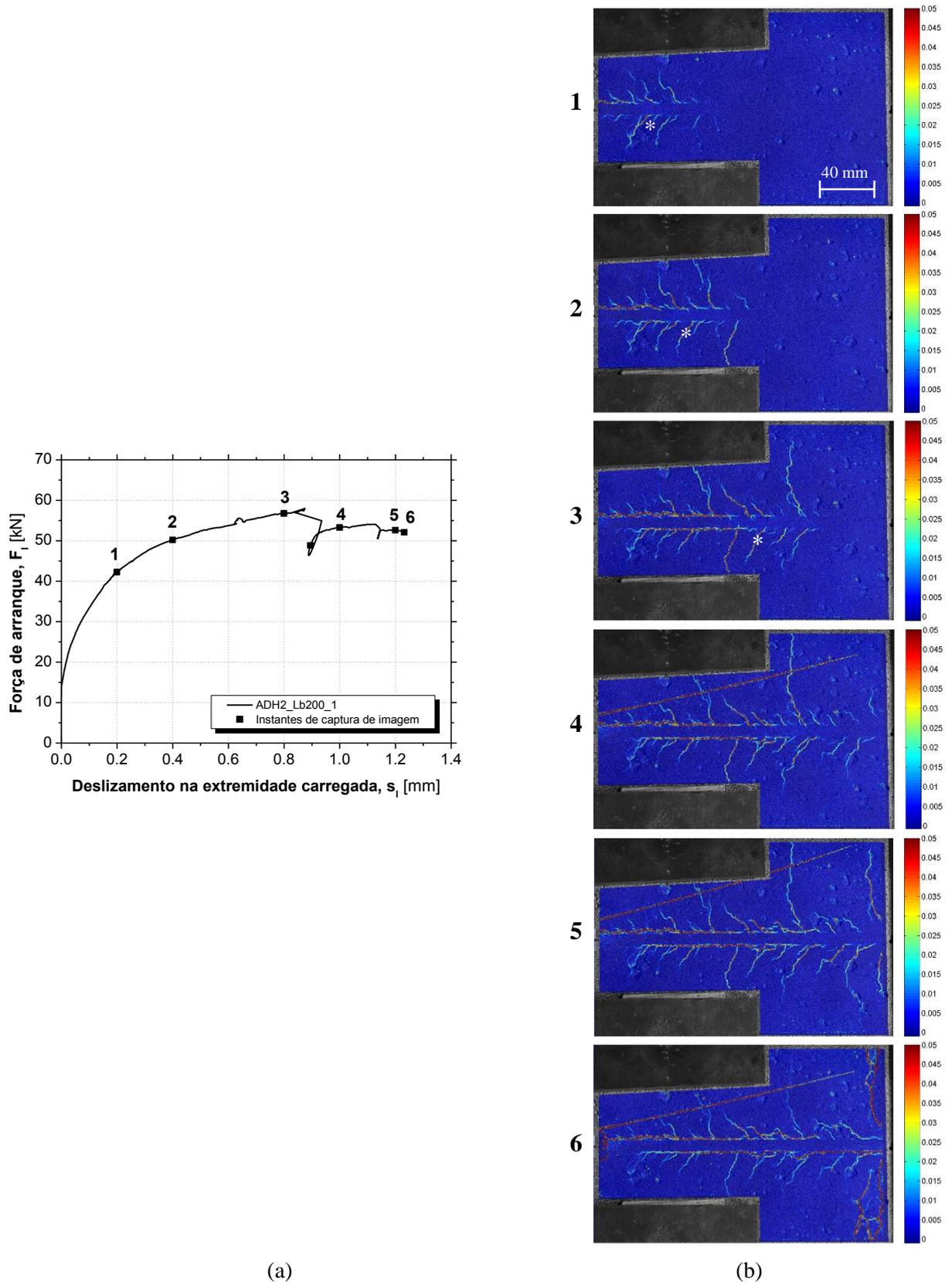


(a)

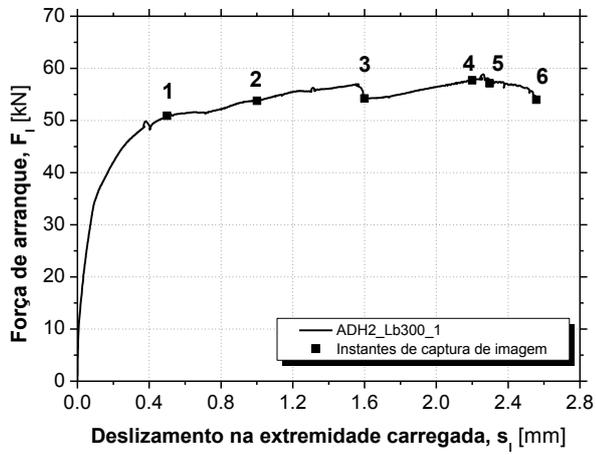
(b)

Notas: as extensões encontram-se em valor absoluto; o símbolo (*) localiza a zona onde provavelmente se encontra a tensão de corte máxima (local).

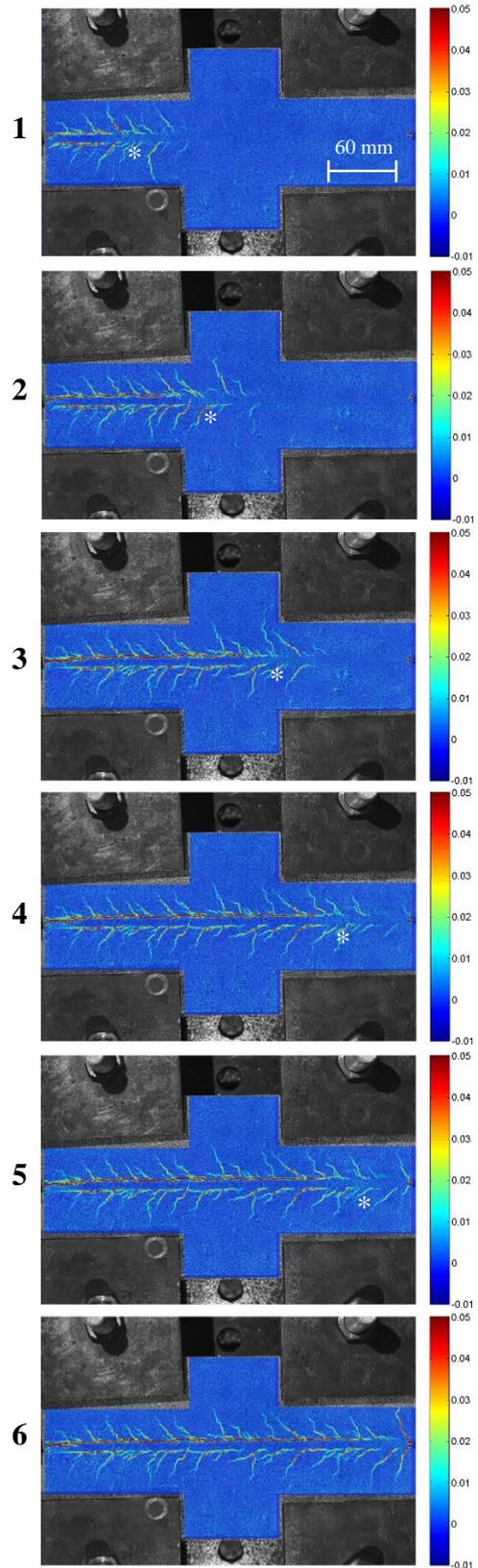
Figura 3.9 – Provete ADH2_L20_Lb100_1: (a) relação F_l versus s_l ; (b) a evolução das extensões principais de tração durante o ensaio.



Notas: as extensões encontram-se em valor absoluto; o símbolo (*) localiza a zona onde provavelmente se encontra a tensão de corte máxima (local).
 Figura 3.10 – Provete ADH2_L20_Lb200_1: (a) relação F_l versus s_l ; (b) a evolução das extensões principais de tração durante o ensaio.



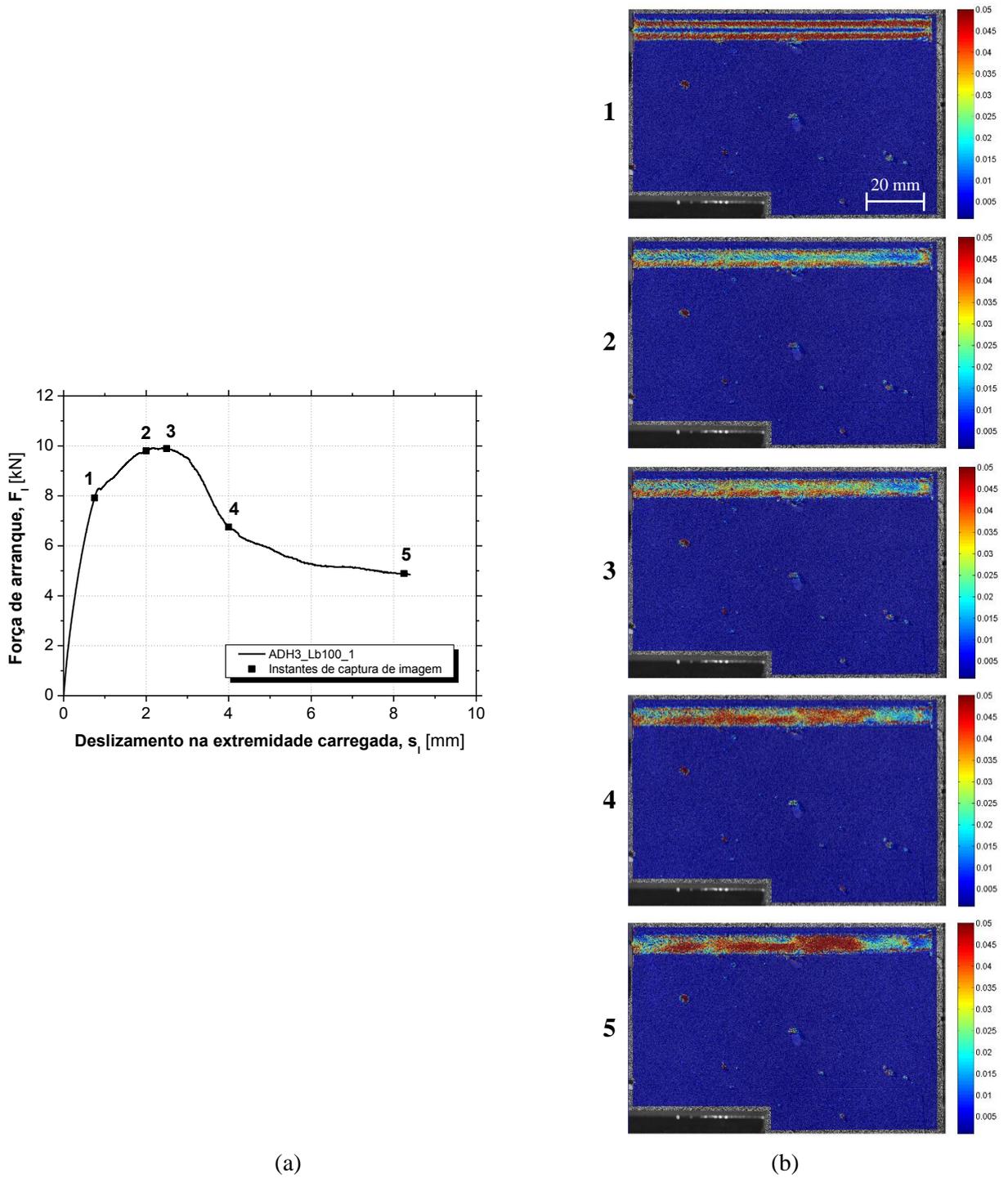
(a)



(b)

Notas: as extensões encontram-se em valor absoluto; o símbolo (*) localiza a zona onde provavelmente se encontra a tensão de corte máxima (local).

Figura 3.11 – Provete ADH2_L20_Lb300_1: (a) relação F_l versus s_l ; (b) a evolução das extensões principais de tração durante o ensaio.



Nota: as extensões encontram-se em valor absoluto.

Figura 3.12 – Provete ADH3_L20_Lb100_1: (a) relação F_l versus s_l ; (b) a evolução das extensões principais de tração durante o ensaio.

Na Tabela 3.4 são apresentados alguns parâmetros relativos à abertura de fenda observada nos ensaios realizados com DIC. São apresentados o número de fendas observado, o número de fendas normalizado para um comprimento de 100 mm e o ângulo médio de fenda de cada provete. Este valor foi obtido efetuando a medição do menor ângulo entre a diretriz do comprimento de ancoragem e a linha média da respetiva fenda. Posteriormente efetuou-se a média dos valores obtidos para cada provete. No caso do provete ADH3_L20_Lb100_1 não existem dados, uma vez que não se verificou abertura de fendas no betão.

Tabela 3.4 – Dados relativos à fendilhação observada com a metodologia DIC.

Provete	Nº de fendas	Nº de fendas normalizado	Ângulo médio (graus)
ADH1_L20_Lb200_2	12	6.0	49.5 (33.3%)
ADH2_L20_Lb100_1	18	18.0	34.6 (40.0%)
ADH2_L20_Lb200_1	14	7.0	51.7 (20.6%)
ADH2_L20_Lb300_1	17	5.7	45.4 (28.0%)

Notas: os valores foram obtidos através de uma análise visual das imagens DIC, sendo que no caso dos ângulos recorreu-se também a ferramentas de medição, pelo que se ressalva a sua subjetividade. Os valores entre parênteses representam os coeficientes de variação (CoV).

3.5.2 Análise dos resultados obtidos

Nesta secção, inicialmente é apresentada uma análise geral dos dados obtidos em termos dos aspetos comuns aos vários casos. Posteriormente há lugar a uma análise às especificidades de cada caso.

Em todos os provetes reforçados com os adesivos 1 e 2 é notório, nas fases iniciais do ensaio, a solicitação do betão mais intensa próximo da extremidade carregada, com já era expectável dado o maior módulo de elasticidade destes adesivos. A solicitação do betão progride ao longo do ensaio no sentido da extremidade livre. É clara a formação de um campo de extensões (assinalado com (*)) na zona onde provavelmente as tensões de corte nas interfaces tomam o valor máximo. Denota-se também que à medida que essa zona de maior solicitação da ligação avança no sentido da extremidade livre, esse campo de extensões acompanha o movimento, registando-se uma diminuição das extensões nas zonas onde anteriormente estava se encontrava o referido campo de extensões, passando estas zonas à fase de amolecimento.

Também com o avanço da solicitação da ligação no sentido da extremidade livre, é notório o aparecimento de novas fendas, bem como o aumento da largura e extensão das já existentes. As forças diagonais de compressão (escoras) no betão são também claras, provocando um padrão de fendilhação no betão em forma de “espinha de peixe”. Este fenómeno inicia-se no adesivo seguindo um mecanismo de forças de compressão e tração (Sena-Cruz, 2005), propagando-se ao betão.

Os danos são menos expressivos no adesivo comparativamente com aqueles observados no betão e na interface adesivo/betão, (ver da Figura 3.8 à Figura 3.11). É evidente o acumular dos danos nesta interface, sobretudo após o avanço do referido campo de extensões em direção à extremidade livre. No caso do provete reforçado com o adesivo 3, o comportamento foi exatamente o oposto, com os danos a centrarem-se no adesivo e não no betão.

Na Figura 3.8 são apresentados os dados obtidos para o provete ADH1_L20_Lb200_2. Além dos aspetos enunciados anteriormente, no instante 4, perto do ponto de rotura do laminado de CFRP, é evidente a grande extensão da fenda próxima à extremidade livre e que já era perceptível desde o instante 1. Entre esta fenda e a extremidade livre a solicitação do betão parece não ser tão intensa, o que pode evidenciar que o comprimento de ancoragem situado entre esta fenda e a extremidade carregada terá sido praticamente suficiente para desenvolver uma resistência capaz de equilibrar a força aplicada no laminado, ou seja, será o comprimento de desenvolvimento da ligação - L_d . No ponto 5, após a rotura do laminado de CFRP é visível uma diminuição geral do campo de extensões fruto da libertação das tensões já que o laminado de CFRP acabava de atingir a sua resistência última. Ainda na imagem respeitante a este ponto, as linhas avermelhadas na zona da extremidade carregada são fibras de laminado que se moveram para esta zona após a sua rotura.

Analisando a Figura 3.9 correspondente ao provete ADH2_L20_Lb100_1, no ponto 1 da curva $F_l - s_l$ o comportamento tende a ser linear. A imagem correspondente mostra que o betão está praticamente intacto, o que pode ajudar a justificar a linearidade observada até então na resposta $F_l - s_l$. No ponto 2 já houve lugar a uma perda de rigidez, provavelmente relacionada não só, mas também com a fendilhação já observada no betão. No instante 4, no betão mais próximo da extremidade livre observa-se o campo de extensões (também visível no instante 3 com menor intensidade), ou seja, nesta zona há elevadas deformações no betão, o que indica que nesta fase,

as maiores tensões de corte nas interfaces estão presentes nesta zona. Poucos instantes após, na imagem corresponde ao instante 5, já ocorreu rotura por deslizamento do laminado de CFRP na interface adesivo/betão e é clara a diminuição geral das extensões nos materiais. Ainda nesta imagem, devido à queda do batente utilizado para monitorizações com um LVDT, existe uma zona delimitada de sombra próximo da extremidade livre.

O provete ADH2_L20_Lb200_1, cujos dados obtidos com a metodologia DIC são apresentados na Figura 3.10, acabou por ser excluído dos resultados médios apresentados na Secção 3.1.2 devido ao modo de rotura observado ter sido pelo betão e não pelo sistema NSM-CFRP. No entanto, a análise com DIC é efetuada. Além dos aspetos comuns, até ao instante 3 verifica-se uma perda gradual de rigidez do sistema em simultâneo com a abertura progressiva de fendas no betão. Duas fendas de grande extensão são evidentes, a cerca de um e dois terços da distância entre as extremidades carregada e livre. Até este momento, o betão entre a fenda visível mais próxima da extremidade livre aparentemente está intacto, o que parece evidenciar que o comprimento de ligação situado entre a extremidade carregada e a referida fenda é fundamental para conseguir equilibrar as cargas aplicadas. Poucos instantes após a captura da imagem 3 dá-se uma rotura parcial do laminado com perda de secção transversal (a linha avermelhada visível partir imagem correspondente ao instante 4 representa uma parte do laminado que se desagregou). A imposição do deslocamento na extremidade carregada continua com a secção transversal do laminado diminuída e a sollicitação da ligação progride, passando a existir também fendilhação na zona descrita anteriormente como não fendilhada, ou seja, esta porção de L_b passa a ser sollicitada com maior intensidade. Na última imagem, denota-se uma grande fenda transversal a todo o provete de betão, que provocou a divisão deste em duas partes, pelo que os resultados deste ensaio não foram contabilizados para os valores médios.

A Figura 3.11 apresenta os dados para o provete ADH3_L20_Lb300_1, o único com comprimento de 300 mm em que o sistema de análise DIC foi utilizada. À semelhança das descrições anteriores, a rigidez da ligação vai-se alterando até ao instante 1, provavelmente pelos mesmos motivos enunciados anteriormente. A progressão da frente de sollicitação da ligação neste caso é ainda mais evidente dada a extensão do comprimento de aderência. É notória a formação e progressão do campo de extensões que se desvanece à medida que a sollicitação da ligação progride. No momento da captura da foto relativa ao instante 1, o valor de L_b em que a mobilização da ligação é evidente é de cerca de 120 mm. Até ao instante 5, a

força aplicada apenas aumenta 13% e a solitação do comprimento de ancoragem é total, o que de alguma forma contribui para a justificação apresentada na Secção 3.2 para resposta $F_l - s_l$. Assim, um valor de L_b de cerca de 120 mm permite o desenvolvimento de um valor de F_l próximo de F_{lmax} . Fica evidente, para o presente estudo, que a partir desta fase, o aumento de L_b não altera significativamente o valor de F_{lmax} . Na imagem correspondente ao instante 6, existe uma grande fenda de tração junto à extremidade livre.

Finalmente, a caracterização efetuada utilizando o adesivo 3 com comprimento de ancoragem de 100 mm é apresentada na Figura 3.12. O primeiro aspeto relevante prende-se com o facto do dano neste caso se concentrar todo no adesivo e não no betão. As extensões atingidas no adesivo são bastante elevadas logo numa fase inicial e concentram-se sobretudo no adesivo presente entre as faces laterais do laminado e do entalhe. Assim, mesmo para baixos níveis de F_{lmax} , o adesivo deforma-se bastante dado o seu baixo módulo de elasticidade. Como é pouco rígido, não consegue transmitir os esforços ao betão, o que faz com que este esteja intacto e não se observem quaisquer extensões. Após o instante 1, as extensões deixam de se concentrar na zona referida anteriormente e passam a ser mais difusas, provavelmente devido a alguma alteração nos mecanismos de aderência interna. Tais mecanismos podem também estar na base das elevadas extensões observadas a cerca de três quartos de distância entre a extremidade carregada e livre nos instantes 4 e 5. Por fim, também nestes instantes há um alívio das extensões no adesivo próximo à extremidade livre fruto do arrancamento do laminado.

3.5.3 Análise comparativa

Comparando os resultados obtidos para os provetes ADH2_L20_Lb100_1 e ADH3_L20_Lb100_1 em que o comprimento de aderência é comum e de 100 mm, a principal diferença observada foi o dano nos materiais (ver Figura 3.13(a)). No primeiro caso a danificação é sobretudo visível no betão e na interface adesivo/betão, enquanto no segundo caso todos os danos tendem a concentrar-se no adesivo. Por outro lado, dada a maior rigidez do laminado comparativamente com o adesivo, este é mobilizado na sua totalidade logo desde o início do ensaio, ao contrário do que acontece com os adesivos 1 e 2. Em ambos os casos a rotura deu-se por deslizamento na interface adesivo/betão, permanecendo o laminado de CFRP intacto.

Comparando a influência da utilização dos adesivos 1 ou 2 com valores de comprimento de aderência de 200 mm (ver Figura 3.13(b)), não foram encontradas diferenças substanciais. Aliás, o padrão de extensões é em tudo semelhante nos dois casos. Até a existência das duas fendas mais alongadas (ver Figura 3.13(b)) já referidas anteriormente é comum. Por outro lado, na região do L_b situada próximo da extremidade carregada, igualmente o aparecimento de fendas é menor. Em termos do número de fendas observado e dos valores médios obtidos para o ângulo, os valores são em tudo semelhantes (ver Tabela 3.4), o que demonstra mais uma vez a semelhança em termos de comportamento obtido com os dois adesivos em causa. Quanto ao provável comprimento de desenvolvimento (L_d) obtido para F_{lmax} , (definido pelo comprimento de ancoragem em que a fendilhação é intensa, o que indica que este comprimento é mais solicitado) situou-se em cerca de 158 mm e 143 mm respetivamente para os provetes com os adesivos 1 e 2, valores bastante próximos. Analisando as respetivas curvas $F_l - s_l$ denota-se que s_{lmax} é superior com a utilização do adesivo 1, comparativamente com a utilização do adesivo 2, facto concordante com os valores de comprimento mobilizado até esta fase. Assim, o adesivo 2 parece proporcionar uma melhor fixação comparativamente com o adesivo 1, pelo menos até este nível de carga e especificamente para estes casos que podem não ser representativos da generalidade.

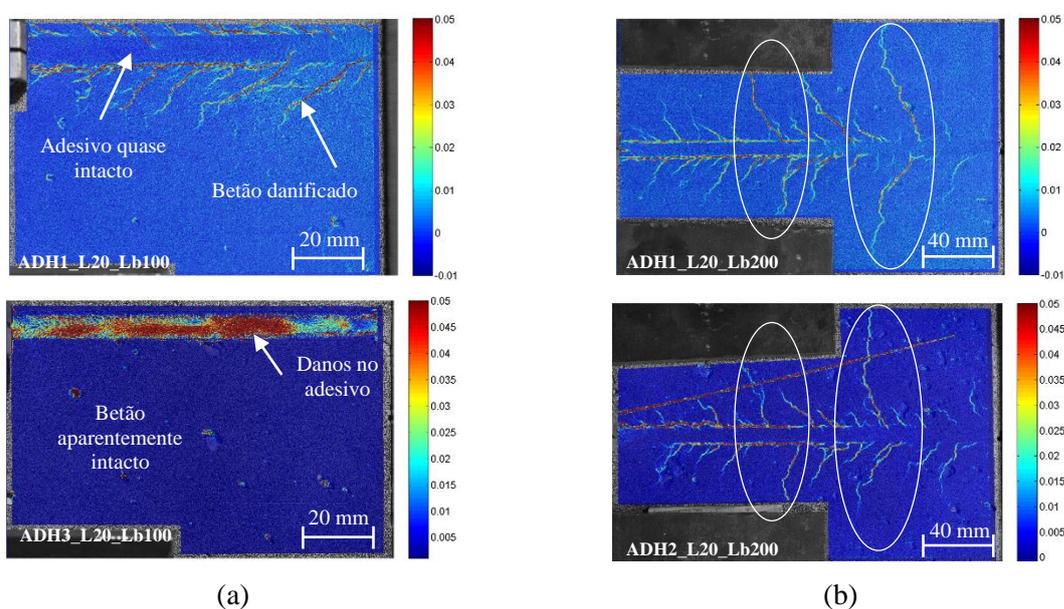


Figura 3.13 – Comparação dos danos nos materiais entre provetes de diferentes adesivos e iguais comprimentos de ancoragem: (a) ADH1_L20_Lb100 e ADH3_L20_Lb100; (b) ADH1_L20_Lb200 e ADH2_L20_Lb200.

Para a utilização do adesivo 2, a pesquisa efetuada com DIC estendeu-se a três comprimentos de ancoragem: 100, 200 e 300 mm. As fendas são mais alongadas na presença do comprimento de 200 mm, comparativamente com os dois restantes. A fendilhação tende a ser mais intensa no caso do menor comprimento, com uma extensão de fendas menor do que nos outros dois casos (ver desde a Figura 3.9 até à Figura 3.11). Quanto à evolução do ângulo das fendas não foi observada uma tendência. De salientar que, neste caso, se compararmos a extensão do comprimento fendilhado para uma carga de 50 kN, no caso do comprimento de 100 mm toda a ligação já está solicitada, mas nos casos de 200 mm e 300 mm, os valores da extensão de solicitação são respetivamente 112 mm e 120 mm (valores aproximados), valores próximos e aparentemente independentes de L_b . Este aspeto é concordante com o estudo efetuado por (Peng *et al.* (2015)) em que os autores demonstraram que para um certo nível de carga, as extensões verificadas no laminado de CFRP ao longo do L_b é praticamente independente do comprimento de ancoragem, ou seja, a lei local de aderência *versus* deslizamento não parece depender do comprimento de ancoragem.

3.6 Conclusões

Foi realizado um programa experimental com vista ao estudo da aderência na ligação segundo a técnica NSM na presença de vários adesivos de diferentes propriedades resistentes, duas secções transversais distintas para o laminado de CFRP, bem como vários comprimentos de ancoragem. Em termos do desempenho desta técnica de reforço, nas condições do estudo, as seguintes conclusões podem ser retiradas:

- O reforço com o adesivo 1 tende a ser mais eficiente nos maiores comprimentos de ancoragem, ao contrário do adesivo 2;
- O adesivo 3 confere bastante menor resistência à ligação do que os outros dois;
- Nos estudos do programa experimental efetuado, existe uma tendência para os valores máximos da tensão tangencial média no comprimento de ancoragem não serem influenciados pela secção transversal do laminado;
- Contrariamente aos adesivos 1 e 2, no caso do adesivo 3 não se verificou o decréscimo da tensão tangencial média com o incremento do comprimento de ancoragem;
- A capacidade de aproveitamento das propriedades resistentes do laminado tende a ser melhor com o laminado de menor secção transversal;

- Com os adesivos 1 e 2 e na presença do laminado de maior secção transversal, nem mesmo para os maiores comprimentos de aderência, capazes provocar a rotura do laminado, as percentagens de eficiência se aproximam da capacidade resistente do laminado verificada no ensaio de tração uniaxial;
- Ao contrário de outros estudos semelhantes em que vários modos de rotura foram observados, apenas o deslizamento na interface adesivo/betão e rotura do laminado de CFRP foram registados nos ensaios realizados;
- Não foram notados danos, nem fendilhação no betão circundante ao comprimento de ancoragem do laminado através de observação direta.
- A metodologia DIC permite identificar os mecanismos de resistência da ligação, bem como caracterizar o campo de extensões nos materiais constituintes do sistema. Assim, é evidente a progressão da zona de maior sollicitação da ligação ao longo do ensaio, facto mais evidente nos maiores comprimentos de ancoragem. Este facto pode explicar o comportamento quase em patamar observado nas curvas $F_l - s_l$ a partir de certo instante, sobretudo com a utilização dos maiores comprimentos de ancoragem testados.
- O adesivo 3 apresenta diferenças significativas nos mecanismos de transferência de esforços entre o laminado de CFRP e o betão comparativamente com os dois outros adesivos em estudo. A sua capacidade de mobilização das propriedades resistentes do betão é diminuta.
- A utilização de DIC permite identificar a porção de comprimento de ancoragem que está a ser sollicitado para um determinado nível de carga, o que, apenas para um dos casos, permitiu verificar que esse valor é pouco dependente do comprimento total da ligação;
- O sistema de ensaio para os provetes prismáticos apresentou alguns problemas, o que poderá ter causado alterações nos resultados. Por outro lado, são efetuadas comparações diretas entre resultados obtidos em provetes prismáticos e cúbicos, resultados esses que podem ter sido influenciados pela geometria do elemento de betão.

CAPÍTULO 4

ENSAIOS DE FLEXÃO EM FAIXAS DE LAJE: RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

De forma a caracterizar o comportamento à flexão de faixas de laje reforçadas segundo a técnica NSM foi realizado um programa experimental. O estudo incidiu sobre aspetos particulares do reforço com esta técnica: a avaliação da influência nos padrões de comportamento destes elementos de betão utilizando diferentes adesivos, bem como em que medida a existência ou não de fendilhação prévia ao reforço pode alterar o desempenho destes elementos de betão. Desta feita, foram realizados ensaios à flexão em sete faixas de laje. Uma faixa de laje serviu de referência para as restantes e nesta não foi aplicado qualquer tipo de reforço. As restantes faixas de laje dividem-se em dois grupos. A diferença entre grupos reside na existência ou não de pré-fendilhação. Cada grupo é composto por três lajes, sendo que cada uma delas apresenta-se reforçada com recurso à técnica NSM utilizando um dos três tipos de adesivo em estudo. Os ensaios monotónicos à rotura das faixas de laje realizaram-se sob controlo de deslocamento segundo a configuração apresentada no Capítulo 2.

No presente capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios à flexão em faixas de laje, bem como as ilações retiradas dos resultados obtidos.

4.1 Resumo dos principais resultados obtidos

A Tabela 4.1 apresenta o resumo dos principais resultados obtidos dos ensaios de flexão levados a cabo com as faixas de laje. Nesta tabela, K_I , K_{II} e K_{III} representam, respetivamente, a rigidez à flexão apresentada pelas faixas de laje nas três fases que compõe a resposta típica deste tipo de elementos estruturais: (i) fase elástica; (ii) fase fendilhada; (iii) fase pós-cedência da armadura longitudinal. F_{cr} , F_y e F_{max} correspondem, respetivamente, à força registada no início da fendilhação, plastificação das armaduras e carga máxima registada, enquanto δ_{cr} , δ_y e δ_{max} são os respetivos deslocamentos verticais a meio vão; ε_{fmax} é a extensão no laminado registada para F_{max} . É também apresentado o incremento de carga percentual relativo à laje de referência para as lajes reforçadas. A análise da ductilidade apresentada por cada uma das faixas de laje foi também realizada e encontra-se expressa através da relação entre os valores dos

deslocamentos relativos às forças F_{\max} e F_y , i.e., δ_{\max}/δ_y . Por fim, a última coluna indica o modo de rotura observado para cada uma das faixas de laje.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios das faixas de laje

Faixa de laje	Rigidez à flexão			Início da fendilhação		Plastificação das armaduras		Carga máxima			Parâmetro de ductilidade	MR
	K_I	K_{II}	K_{III}	δ_{cr}	F_{cr}	δ_y	F_y	δ_{\max}	F_{\max}	$\varepsilon_{f\max}$	δ_{\max}/δ_y	--
	[kN/mm]			[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[10 ⁻³]	[-]	--
SL_REF	7.75	0.78	0.01	0.71	7.57	20.17	21.47	158.43 ⁽¹⁾	23.56 ⁽¹⁾	-	-	-
SL_ADH1_U	9.57	1.10	0.40	1.25	10.86 (43%)	21.85	31.93 (49%)	74.04	52.87 (124%)	12.06	3.39	F
SL_ADH2_U	8.95	1.07	0.41	1.35	10.52 (39%)	22.47	31.11 (45%)	74.95	52.08 (121%)	12.49	3.34	F
SL_ADH3_U	7.94	1.28	0.34	1.58	10.86 (43%)	20.79	27.35 (27%)	72.24	42.71 (81%)	8.46	3.47	D
SL_ADH1_C	6.30 ⁽²⁾	1.92	0.41	1.32 ⁽²⁾	7.16 ⁽²⁾	18.95	31.58 (47%)	68.87	51.53 (119%)	12.46	3.63	F
SL_ADH2_C	6.03 ⁽²⁾	1.91	0.40	0.99 ⁽²⁾	7.78 ⁽²⁾	17.36	30.47 (42%)	69.33	51.06 (117%)	12.02	3.99	F
SL_ADH3_C	5.38 ⁽²⁾	1.81	0.34	1.06 ⁽²⁾	6.18 ⁽²⁾	13.97	24.61 (15%)	69.54	41.82 (78%)	8.33	4.98	D

Notas: F – Rotura do laminado de CFRP; D – Rotura por deslizamento do laminado; os valores entre parêntesis representam o incremento percentual em termos de força relativo à faixa de laje de referência (SL_REF) para cada uma das fases em estudo.

⁽¹⁾ Valores máximos registados durante o ensaio sem que tenha havido rotura da laje (esmagamento do betão por compressão ou rotura das armaduras longitudinais de tração).

⁽²⁾ Valores resultantes da fase de pré-fendilhação (para mais detalhes consultar o Capítulo 2).

4.2 Curvas força *versus* deslocamento a meio vão

A Figura 4.1 apresenta as curvas força *versus* deslocamento vertical a meio vão obtidas durante os ensaios realizados às faixas de laje em estudo.

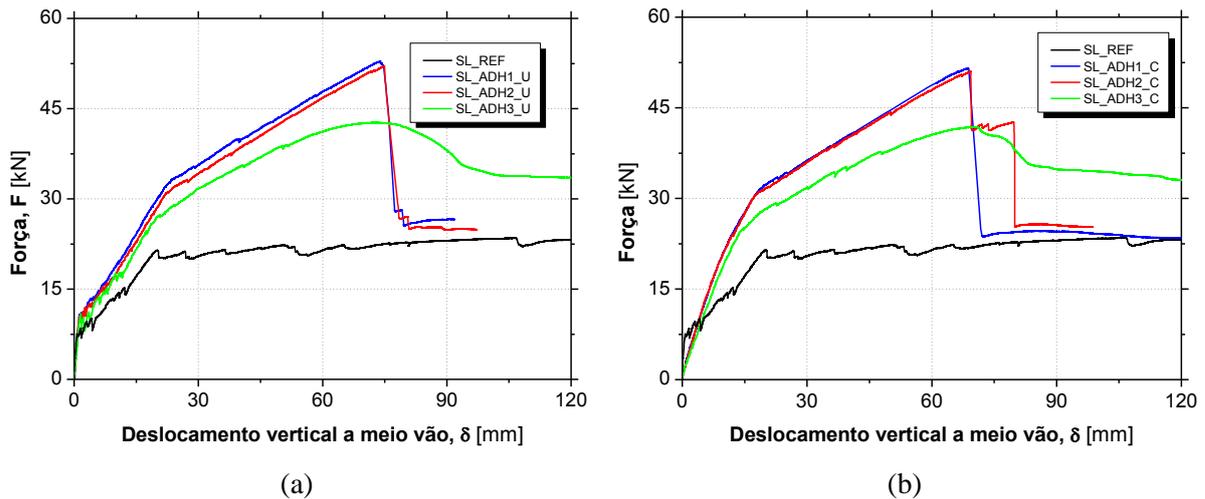


Figura 4.1 – Força vs. deslocamento a meio vão para as séries não pré-fendilhada (a) e pré-fendilhada (b).

As curvas $F - \delta$ apresentam o comportamento típico para elementos de betão reforçados com laminados de NSM-CFRP submetidos a esforços de flexão. O primeiro aspeto relevante prende-se com o aumento evidente da capacidade de carga resultante da aplicação do reforço. Com exceção das lajes pré-fendilhadas podem observar-se três importantes fases. A primeira, fase elástica, que vai desde o início do ensaio até ao início da fendilhação do betão tracionado (inexistente nas faixas de laje pré-fendilhadas). Nesta fase, todos os materiais constituintes das faixas de laje contribuem para a rigidez elástica à flexão (K_I). A segunda fase vai desde o início da fendilhação até à cedência das armaduras longitudinais de tração (rigidez K_{II}) e a terceira começa na cedência das destas armaduras e vai até à carga máxima, sendo caracterizada pela rigidez K_{III} . Portanto, as faixas de laje da série não pré-fendilhada exibem três estados de comportamento à flexão, enquanto as da série pré-fendilhada exibem apenas dois. Na passagem entre fases existe diminuição da rigidez à flexão devido à perda de eficiência mecânica dos materiais e da interligação entre estes.

A resposta obtida em fase elástica foi idêntica para todas as lajes, sendo aproximadamente igual à não reforçada devido ao baixo nível de reforço utilizado. O mesmo se verificou para a fase fendilhada, mas nesta fase a rigidez à flexão é inferior no caso de não existir reforço. A faixa de laje de referência (SL_REF) tem um comportamento plástico após a cedência das armaduras de tração como já era expectável. Pelo contrário, nas lajes reforçadas, após a cedência das armaduras, as lajes em que estão presentes os adesivos 1 e 2 apresentam comportamento quase linear até à rotura devido à contribuição dos laminados de CFRP. Refira-se que nesta fase o aço

em tração já se encontra em cedência e o betão tracionado já está fendilhado pelo que a capacidade crescente de carga é assegurada fundamentalmente pelos laminados à tração e pelo betão à compressão. Por outro lado, haverá que referir que nestas lajes os adesivos em causa asseguram um elevado nível de aderência entre os laminados de CFRP e o substrato. Uma vez explorada a capacidade resistente dos laminados, o comportamento das faixas de laje reforçadas passa a ser bastante próximo do observado para a faixa de laje de referência.

Na faixa de laje SL_ADH2_C, a rotura dos laminados não se deu ao mesmo tempo, tendo rompido um e só mais tarde o outro, o que explica que na curva da Figura 4.1(b) exista um nível intermédio de carga entre a força máxima e a carga residual. No caso das lajes reforçadas com o adesivo 3 (SL_ADH3) e no terceiro ramo, ao contrário das faixas de laje reforçadas com os adesivos 1 e 2, estas, a partir de determinado momento deixam de apresentar comportamento similar às restantes. Nestas faixas de laje, as propriedades resistentes do laminado de CFRP não foram completamente exploradas, como se mostrará posteriormente. Após o registo da carga máxima, há lugar a uma queda suave da força registada com o aumento da deformação imposta, sendo que a tendência é o comportamento destas lajes se aproximar de forma gradual do observado na laje de referência. Esta tendência de aproximação pode dever-se à perda gradual da aderência entre o laminado de CFRP e o adesivo, bem como à desagregação do adesivo, o que implica uma cada vez menor contribuição dos laminados de CFRP para a resistência à flexão das faixas de laje.

Durante o ensaio da faixa de laje SL_ADH1_C, ocorreu um problema técnico com o sistema servo-controlado de aplicação de carga, tendo este ensaio sido interrompido próximo dos 40 kN de carga aplicada. Após isto, procedeu-se à descarga da faixa de laje. Posteriormente procedeu-se a um novo carregamento até à rotura. A curva apresentada para esta faixa de laje na Figura 4.1(b) resulta da combinação das duas curvas resultantes das duas fases deste ensaio.

4.3 Modos de rotura

Fundamentalmente foram observados dois modos de rotura distintos nas faixas de laje ensaiadas (ver Figura 4.2). Estes modos estão diretamente relacionados com as propriedades mecânicas dos três tipos de adesivos estudados. Assim, nas faixas de laje em que os adesivos utilizados para a elaboração do reforço foram os adesivos 1 e 2 (SL_ADH1 e SL_ADH2),

ocorreu a rotura dos laminados de CFRP a meio vão (ver Figura 4.2(a)). Por sua vez, as faixas de laje reforçadas na presença do adesivo 3 (SL_ADH3) apresentaram um modo de rotura distinto: deslizamento do laminado relativamente ao betão por rotura do adesivo. Nestas lajes não se observou a rotura dos laminados de CFRP. A meio vão foi evidente o deslizamento na interface laminado/adesivo (ver Figura 4.2(b)), enquanto que nos extremos o adesivo ficou completamente destruído (ver Figura 4.2 (c)). Este fenómeno foi visível numa das extremidades de um dos laminados de cada uma das duas lajes em que o adesivo em causa foi utilizado. Pontualmente foram também notados indícios de deslizamento do laminado de CFRP noutras zonas do reforço (ver Figura 4.2(d)).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.2 – Modos de rotura: (a) rotura do laminado de CFRP (lajes reforçadas com os adesivos 1 e 2); (b) deslizamento do laminado (lajes reforçadas com o adesivo adesivo 3); (c) desagregação do adesivo na extremidade (lajes reforçadas com o adesivo 3); (d) indícios de deslizamento do laminado entre a secção de meio vão e a extremidade (lajes reforçadas com o adesivo 3).

Pontualmente foi também notada fissuração do adesivo transversalmente ao sentido de desenvolvimento do reforço, sobretudo nas zonas em que o betão tracionado também se

encontrava fendilhado. Também foram encontradas fissuras de corte “em espinha de peixe” no adesivo. Estes aspetos foram evidentes para os três adesivos utilizados. Por vezes, surgiram também algumas fissuras na interface adesivo/betão, fenómeno mais evidente para as lajes reforçadas com os adesivos 1 e 2.

4.4 Largura de fendas, padrão de fendilhação e distância entre fendas.

A largura de fendas foi medida através de um microscópio portátil com um fator de ampliação de 20×. Para isto, foram selecionadas três fendas na zona de flexão pura, uma a meio vão e as duas restantes sob os pontos de aplicação de carga. Foi monitorizada a largura de cada uma das fendas com o incremento de deformação vertical até um nível de força próximo dos 30 kN, por razões de segurança. Para cada uma das fotografias tiradas com o microscópio, foi medida a largura da fenda em três pontos de modo a obter-se uma largura média para a fenda em causa. A Figura 4.3 apresenta a evolução da abertura média de fenda *versus* força aplicada até aos valores de carga aplicada inferiores aos registados para a cedência das armaduras longitudinais de tração, uma vez que a partir desta fase a relação $F - w$ deixa de seguir a linearidade verificada até então.

Analisando os resultados da Figura 4.3, é notório que alguns valores obtidos para o coeficiente de correlação da reta de tendência não são os melhores, o que impede de tirar algumas conclusões. Regra geral, o reforço das faixas de laje, para os mesmos níveis de carga, faz com que a abertura de fenda seja menor, quando comparada com a laje de referência. Exceção para as lajes SL_ADH3 em que os valores obtidos foram superiores aos verificados na faixa de laje de referência, provavelmente devido a uma situação pontual em que a fenda escolhida para a medição apresentou valores não representativos da abertura de fenda para esta faixa de laje. A tendência verificada é para existência de menores valores de abertura de fenda nas lajes SL_ADH1 e SL_ADH2 quando comparados com os valores obtidos para as lajes SL_ADH3 quer com a existência de pré-fendilhação, quer na ausência desta. A retas de tendência obtida com o uso dos adesivos 1 e 2, regra geral, apresenta maior inclinação do que a verificada para o adesivo 3, ou seja, o adesivo 3 é o que menor contributo oferece na redução da abertura de fendas.

Comparando as duas séries, não pré-fendilhada e pré-fendilhada, é notório início da medição mais tarde no primeiro caso dada a existência da fase elástica. Pelo contrário, na série pré-fendilhada, a largura de fenda começa a ser registada logo no início do ensaio. O comportamento observado pode eventualmente ser justificado pelos seguintes factos: (i) as fendas terem sido seladas durante o processo de reforço; (ii) a pré-fendilhação ter alcançado a fase de estabilização do processo de formação de fendas, ao contrário da série não pré-fendilhada em que desde o início da fase fendilhada, novas fendas vão aparecendo continuamente (fendilhação não estabilizada), facto que conduz a um maior aumento da largura de fenda para o mesmo incremento de força aplicada, comparativamente com a série pré-fendilhada. Refira-se que este aspeto é comum às curvas $F - \delta$.

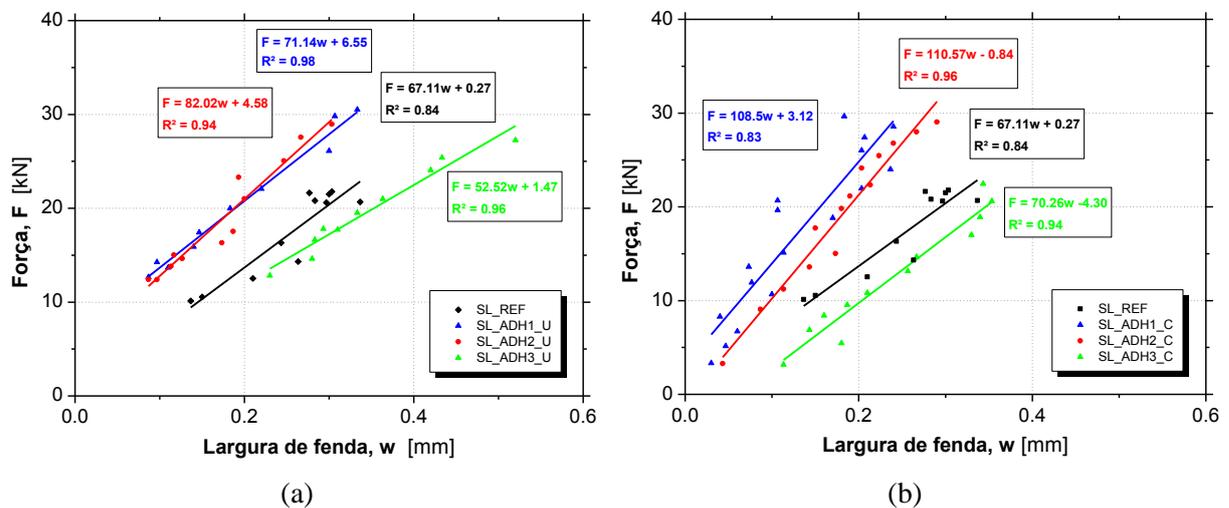


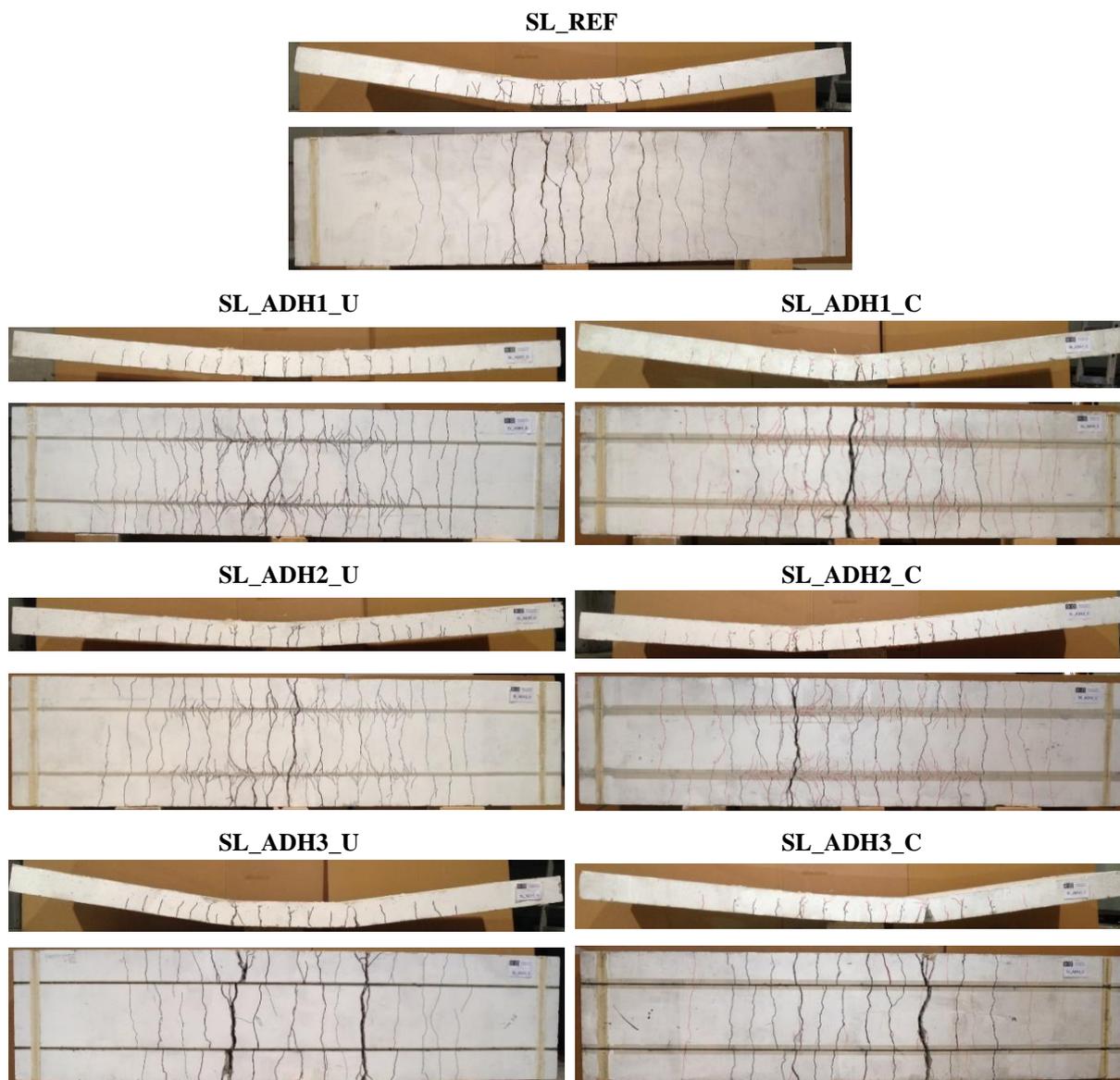
Figura 4.3 – Evolução da largura de fenda para: (a) série não pré-fendilhada; (b) série pré-fendilhada.

De uma forma geral, pode ser estabelecido um paralelismo entre estes resultados e os obtidos para o comportamento em termos de força *versus* deslocamento a meio vão, em que os dados obtidos com os adesivos 1 e 2 são semelhantes, com tendência para maiores valores de largura de fenda no caso das lajes SL_ADH2, tal como acontece nos deslocamentos a meio vão (exceção para o caso em que a pré-fendilhação é inexistente, no entanto dada a baixa correlação entre os valores não é possível retirar conclusões objetivas). No mesmo sentido, a abertura de fendas é também superior para os mesmos níveis de força aplicada no caso em que o adesivo 3 é usado. Os valores de deslocamento a meio vão para a série não pré-fendilhada são superiores aos existentes para a série pré-fendilhada, facto concordante com a análise de força *versus* abertura de fenda, em que a abertura de fenda tende também a ser superior na série sem pré-fendilhação.

O padrão de fendilhação foi também avaliado no final dos ensaios efetuados. Assim, na Figura 4.4 apresentam-se os padrões de fendilhação para cada faixa de laje após o respectivo ensaio apresentados quer para a face lateral, quer para a face inferior. Por sua vez, a Figura 4.6 apresenta os resultados relativos à distância média entre fendas para cada uma das faixas de laje ensaiadas. Estes valores foram obtidos através da medição das respectivas distâncias entre fendas na face lateral da faixa de laje exposta durante o ensaio (ver Figura 4.5), sendo posteriormente obtido o valor médio para os dados recolhidos. Numa primeira análise poder-se-á dizer que o padrão de fendilhação nas faixas de laje encontra-se fortemente relacionado com o adesivo aplicado no reforço.

Analisando a Figura 4.4 pode afirmar-se que existem dois tipos de fendilhação, com exceção da faixa de laje de referência e das em que o adesivo 3 foi utilizado no reforço com laminados de CFRP. O primeiro tipo de fendilhação resulta do processo de flexão a que a faixa de laje é sujeita, apresentando-se as fendas transversalmente ao desenvolvimento longitudinal da faixa de laje. Este deve-se, fundamentalmente, à direção das tensões principais que ocorrem nas faixas de laje devido aos esforços de flexão. O outro tipo de fendilhação, apenas presente nas faixas de laje em que os adesivos 1 e 2 foram utilizados, consiste na presença de fendas de corte situadas no betão circundante ao entalhe onde o reforço é efetuado (ver Figura 4.4), resultantes da transmissão de esforços entre os materiais. Este fenómeno é designado por “espinha de peixe” (*herringbone*) e encontra-se descrito na literatura, e.g. Oehlers *et al.* (2008). De salientar a inexistência de fendas resultantes do esforço de corte, no vão de corte.

A presença do reforço provocou alterações no padrão de fendilhação observado para as faixas de laje relativamente à laje de referência. Desta forma, houve lugar a um aumento do número de fendas, bem como ao incremento da largura da banda de fendilhação, que tende a afastar-se da zona de flexão pura (ver Figura 4.4). Por outro lado, a distância média entre fendas diminuiu (ver Figura 4.6), com reduções de cerca de 20%, 29% e 16% respetivamente para as faixas de laje reforçadas com os adesivos 1, 2 e 3 relativamente à faixa de laje de referência no caso da série não pré-fendilhada. Ainda nesta série, a distância média entre fendas foi ligeiramente superior com o uso do adesivo 1, relativamente ao uso do adesivo 2. A largura da banda de fendilhação e o número de fendas também foram ligeiramente superiores.



Notas: nas faixas de laje de referência e sem pré-fendilhação todas as fendas foram marcadas com cor preta; nas faixas de laje que foram previamente fendilhadas, as fendas resultantes da pré-fendilhação encontram-se marcadas com cor preta, enquanto as resultantes do ensaio até à rotura foram realçadas com cor encarnada.

Figura 4.4 – Padrões de fendilhação obtidos após o ensaio das faixas de laje.

No caso da utilização do adesivo 3, este apresenta um comportamento algo díspar dos dois primeiros, estando o padrão de fendilhação mais próximo do obtido para a faixa de laje de referência, apresentando uma maior distância média entre fendas, quando comparada com o caso em que se recorre ao uso dos adesivos 1 e 2, bem como menor incremento no número de fendas e largura da banda de fendilhação (ver Figura 4.4). Este comportamento pode ser explicado pelo facto deste adesivo (3) não ser tão eficiente (mobilizador) do reforço. De facto, de acordo com a literatura, com o aumento do reforço é possível assegurar que a distância necessária para a formação de uma nova fenda entre duas existentes diminua. Assim, uma vez

que o adesivo 3 é menos eficiente que os dois restantes, a distância necessária para a formação de uma nova fenda é superior neste caso.

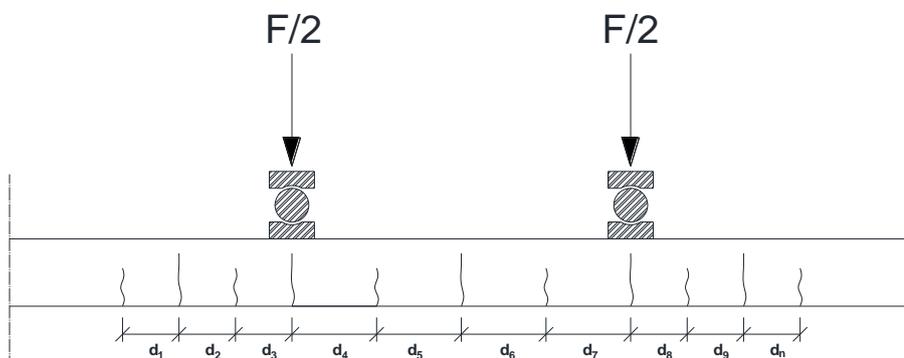


Figura 4.5 – Determinação da distância média entre fendas.

Comparando a série sem pré-fendilhação com a série pré-fendilhada, houve lugar a uma maior distância média entre fendas, à exceção das faixas de laje em que o adesivo 1 foi usado. Assim, as percentagens de redução deste parâmetro relativamente à laje SL_REF foram de 34%, 23% e 12% respetivamente para as lajes SL_ADH1_C, SL_ADH2_C e SL_ADH2_C. Estes valores são inferiores aos obtidos para a série não pré-fendilhada, com exceção da laje SL_ADH1_C.

Contrariamente às faixas de laje em que não houve pré-fendilhação, a distância média entre fendas é superior no caso da laje SL_ADH2_C comparativamente com a laje SL_ADH1_C. Em termos de largura da banda de fendilhação, observa-se um aumento no caso das lajes reforçadas com os adesivos 1 e 2, mantendo-se praticamente igual quando o adesivo 3 é aplicado. Pelo contrário, a fendilhação prévia tende a reduzir o número de fendas com a utilização de um mesmo adesivo.

Por fim, deve referir-se que a aplicação de fendilhação prévia nas respetivas faixas de laje provocou um padrão de fendilhação menos intenso e menos extenso que observado no ensaio à rotura. Durante este último ensaio, houve lugar ao aparecimento de fendas interiores às que já existiam, bem como ao incremento da largura da banda de fendilhação (ver Figura 4.4).

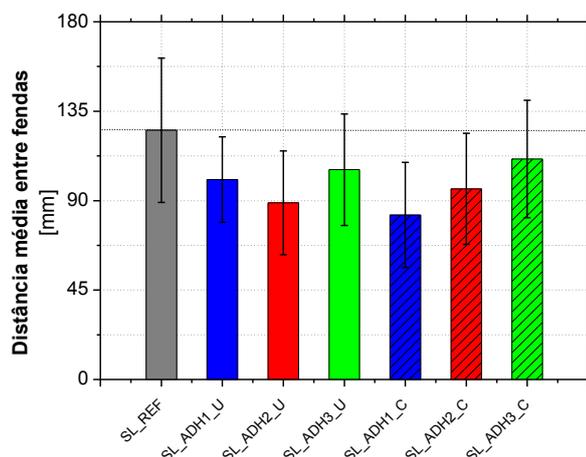


Figura 4.6 – Distância média entre fendas de cada faixa de laje.

A fendilhação no betão na zona junto do entalhe onde o laminado de CFRP é introduzido é também evidente para as faixas de laje em que os adesivos 1 e 2 foram aplicados (ver Figura 4.4). A solicitação do laminado de CFRP durante aplicação de carga gera um conjunto de tensões tangenciais na interface entre o adesivo e o betão de tal forma que é gerado um estado de tensão no betão circundante ao entalhe onde foi colocado o laminado. Uma vez excedida a capacidade resistente do betão à tração dá-se o aparecimento de fendas de corte em determinadas zonas do betão nas proximidades do entalhe.

Na Figura 4.7 é apresentado um esquema da orientação das fendas resultantes da transmissão das cargas entre o betão e o laminado de CFRP, bem como dos sentidos de solicitação do laminado ao longo da faixa de laje. Estas fendas localizam-se predominantemente nas zonas próximas aos pontos de aplicação de carga, tendo diferentes orientações dependendo da sua posição relativamente a esses pontos de solicitação. Este facto denuncia que durante o ensaio, o sentido de solicitação do laminado está dependente do modo como os pontos de carga estão distribuídos. Este tipo de fendilhação é aparentemente inexistente quando o adesivo 3 é utilizado, o que mostra a sua menor capacidade de transferência de tensões entre o betão e o laminado de CFRP. Pontualmente foram também notadas fendas na interface adesivo/betão (apenas com a utilização dos adesivos 1 e 2) e também fendilhação no adesivo transversalmente ao sentido de desenvolvimento do laminado sobretudo na zona onde existem fendas no betão tracionado (em todos os adesivos).

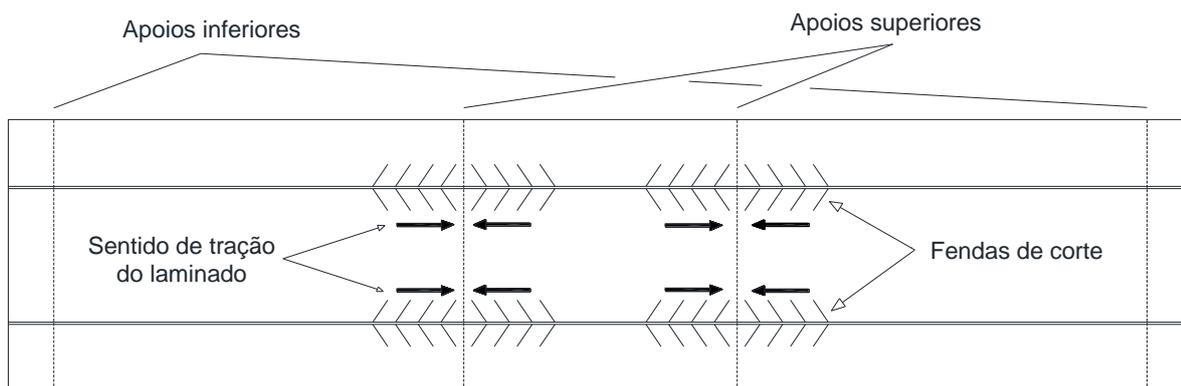


Figura 4.7 – Esquema ilustrativo do sentido de tração dos laminados e orientação das fendas de corte observadas no betão circundante ao entalhe.

4.5 Extensões nos materiais constituintes das faixas de laje

4.5.1 Laminado de CFRP

Na Tabela 4.1 incluem-se as extensões máximas registadas nos laminados de CFRP a meio vão e nas Figura 4.1 são apresentadas as curvas força *versus* extensão no CFRP a meio vão. Estas extensões foram monitorizadas com recurso a extensómetros (ver Capítulo 2). Os valores apresentados na Tabela 4.1 e na Figura 4.8 correspondem aos dados obtidos para o extensómetro que apresentou maiores valores de extensão durante o ensaio, uma vez que se procedeu à monitorização das extensões a meio vão nos dois laminados de CFRP. No caso das faixas de laje SL_ADH1 e SL_ADH2, os valores final das curvas da Figura 4.8 correspondem às extensões de rotura do laminado (para F_{max}), ao contrário do adesivo 3 em que esse valor corresponde ao último valor que foi registado durante o ensaio. Uma vez que houve rotura do adesivo e perda de aderência na interface laminado/adesivo, a extensão do laminado tende a regredir após o registo de F_{max} .

À semelhança da resposta em termos de força *versus* deslocamento a meio vão, nas curvas força *versus* extensão no CFRP a meio vão observam-se também três fases distintas de comportamento nos casos em que não existe pré-fendilhação e duas fases distintas de comportamento quando a pré-fendilhação está presente. Regra geral, a mobilização do laminado é maior no com o uso dos adesivos 1 e 2, comparativamente com o adesivo 3, o que mostra a maior capacidade dos dois primeiros adesivos. Contrariamente ao que acontece nas faixas de laje SL_ADH1 E SL_ADH2, no caso das SL_ADH3 não há lugar à rotura do CFRP,

existindo a partir do valor de força máxima registado nas curvas força *versus* deslocamento uma diminuição da extensão verificada a meio vão no laminado, devido aos motivos já enunciados anteriormente (ver Figura 4.8).

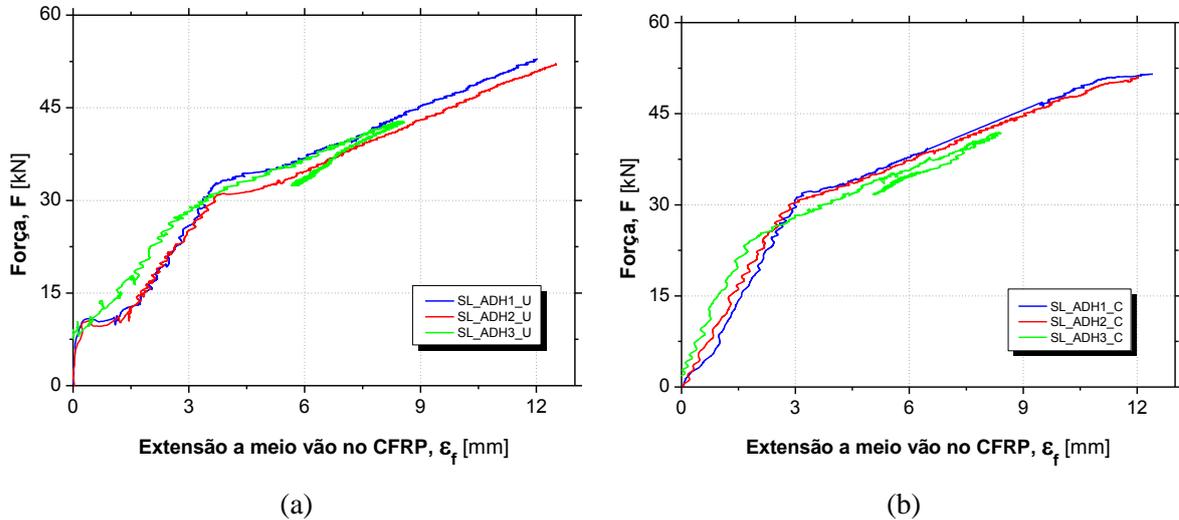


Figura 4.8 – Evolução das extensões nos laminados de CFRP a meio vão nas séries: (a) não pré-fendilhada; (b) pré-fendilhada.

Em termos da extensão de rotura do laminado verificada para as lajes SL_ADH1 e SL_ADH2, o valor médio obtido para a extensão máxima no CFRP nas quatro faixas de laje em que se verificou rotura do laminado é de 12.26 %. Este valor é 29% inferior ao valor médio obtido da caracterização mecânica do laminado de CFRP apresentada no Capítulo 2. A leitura das extensões é efetuada a meia altura do laminado, pelo que no momento da rotura, uma vez que o laminado se encontra submetido a um estado de tensão em flexão, a extensão no laminado na zona inferior será necessariamente superior, daí uma possível explicação para os menores valores de extensão de rotura monitorizados durante o ensaio de flexão. Assim, a rotura do laminado dever-se-á iniciar pelas fibras mais próximas da face inferior da laje, com maior extensão, progredindo gradualmente até às fibras superiores. Este aspeto da diferença entre os valores de extensão de rotura do laminado no ensaio de tração uniaxial e em flexão é comum a outros estudos envolvendo faixas de laje reforçadas segundo a técnica NSM, nomeadamente nas investigações levadas a cabo por Sena-Cruz *et al.* (2012) e Mostakhdemin Hosseini *et al.* (2014).

No caso da série sem pré-fendilhação, numa fase inicial a solicitação do laminado é reduzida, uma vez que o betão não fendilhado tracionado contribui para a capacidade portante da laje. No

momento da abertura das primeiras fendas no betão tracionado, a extensão no laminado de CFRP aumenta significativamente, à custa da perda da contribuição do betão para a resistência da faixa de laje à flexão que lhe é imposta. Denota-se que, nesta fase, este aumento é menos pronunciado no caso da faixa de laje SL_ADH3_U, provavelmente devido à sua menor capacidade de transferência dos esforços para o laminado de CFRP que se encontravam instalados no betão tracionado antes da fendilhação. Com a existência de fendilhação prévia, esta fase inicial referida é inexistente e a solicitação do laminado é intensa logo desde o início do ensaio. Após a plastificação das armaduras inferiores de flexão, a extensão do laminado aumenta significativamente, visto que estas deixam de contribuir para aumentos de força aplicada (ver Figura 4.8). Em termos de extensões máximas na rotura não foram encontradas diferenças significativas devido à existência de pré-fendilhação. Quanto à extensão no momento da cedência das armaduras, esta tende a ser ligeiramente inferior no caso de existir pré-fendilhação.

4.5.2 Aço tracionado

A Figura 4.9 apresenta a evolução das extensões no aço tracionado a meio vão da laje ao longo do ensaio. Os resultados obtidos estão bastante dependente da posição em que o extensómetro usado para medir a extensão se encontra, pois durante o ensaio este pode situar-se numa zona onde existe uma fenda, ou no betão entre fendas, o que vai condicionar os valores obtidos, dificultando por isso, a respetiva análise dos resultados. Idealmente, as curvas deveriam ter as formas apresentadas para o caso da faixa de laje SL_ADH1_C (ver Figura 4.9(b)), em que após a cedência das armaduras, a extensão no aço continua aumentar. Provavelmente, no caso anterior, a fenda abriu na zona em que se encontrava o extensómetro. A discrepância de curvas (verificada apenas nalguns casos), em que existe uma diminuição das extensões verificadas no aço após a plastificação das armaduras poder-se-á dever à formação de rótulas plásticas que acabam por fazer com que a faixa de laje deixe de apresentar curvatura passe a ser constituída aproximadamente por tramos retos, reduzindo a extensão no aço em alguns pontos, entre os quais a meio vão onde estão colocados os extensómetros. Para os adesivos 1 e 2 são apresentados os dados até ao momento rotura do laminado de CFRP, enquanto para o adesivo 3 os dados apenas terminam no final do ensaio.

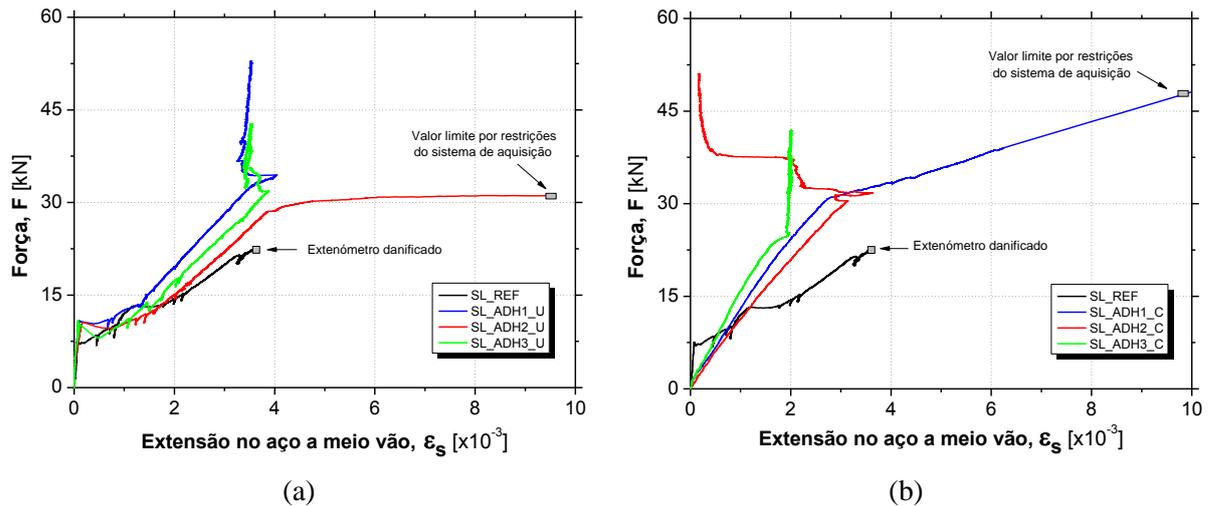


Figura 4.9 – Força vs. extensão no aço tracionado a meio vão nas faixas de laje: (a) sem pré-fendilhação; (b) com pré-fendilhação.

À semelhança do que aconteceu nas extensões do laminado, na série não pré-fendilhada, até ao momento da fendilhação do betão, as extensões no aço são bastante reduzidas, sofrendo um aumento com a formação das fendas. O reforço permite aumentar a carga para a qual ocorre a abertura de fendas e a plastificação das armaduras. Em termos de extensão no aço, denota-se uma menor extensão de cedência com a presença de pré-fendilhação, comparativamente com a faixa de laje de referência (em que a cedência se deu no momento de danificação do extensómetro) e não pré-fendilhadas, provavelmente devido a algum dano já existente no aço resultante das operações de pré-fendilhação. Por outro lado, no caso em que não existe pré-fendilhação, existe uma maior solicitação do aço logo no início do ensaio.

4.5.3 Betão comprimido

Na Figura 4.10 são apresentadas as curvas força *versus* extensão no betão a meio vão. Também no caso do betão, a extensão é menor antes da fendilhação do betão no caso da série não pré-fendilhada. Com a fendilhação do betão tende a haver uma maior solicitação do betão comprimido, aumentando a sua extensão. O mesmo acontece após a plastificação das armaduras. Tendencialmente, as extensões no betão são superiores com a presença do reforço, do que na ausência deste.

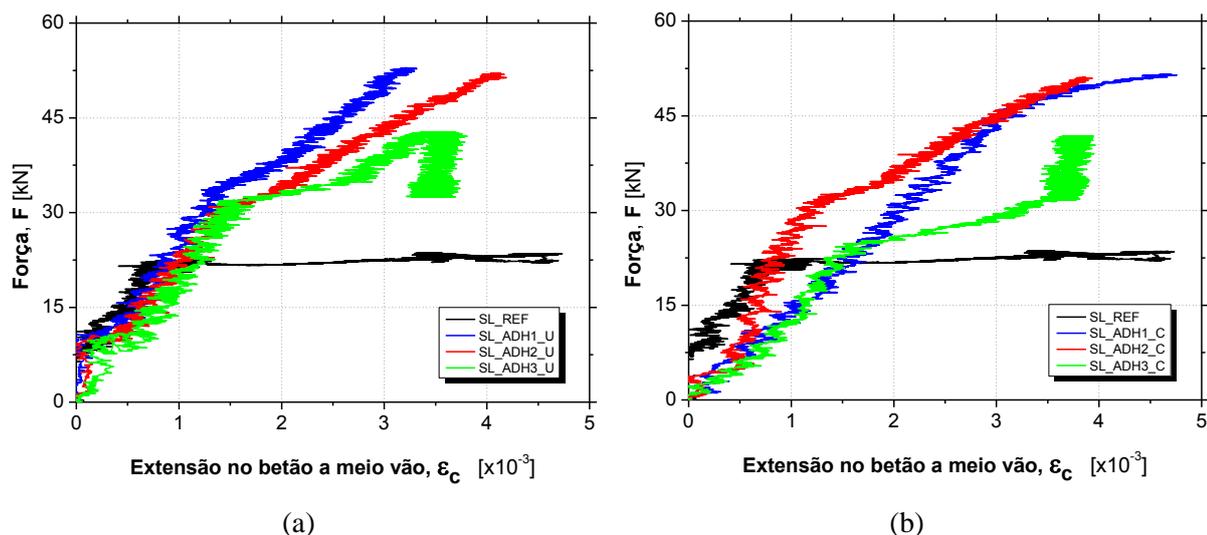


Figura 4.10 – Força vs. extensão no betão a meio vão: (a) série não pré-fendilhada; (b) série pré-fendilhada.

4.6 Influência do tipo de adesivo e da pré-fendilhação no comportamento à flexão das faixas de laje

Nesta secção é apresentada a análise comparativa da resposta obtida no ensaio das faixas de laje tendo em conta os parâmetros estudados. Assim, os seguintes aspetos são analisados: (i) forças registadas no momento da fendilhação do betão, plastificação das armaduras e carga máxima; (ii) deformações verticais a meio vão nas três fases anteriores; (iii) extensão máxima no laminado de CFRP; (iv) ductilidade proporcionada em cada uma das situações; (v) razão entre a força residual no final do ensaio e a força máxima que cada laje é capaz de suportar.

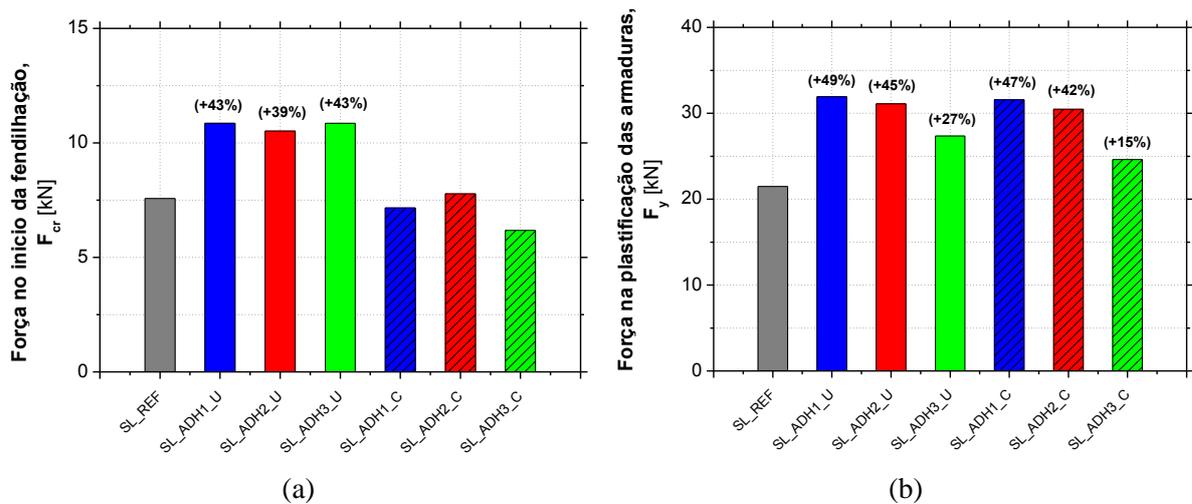
4.6.1 Carga de fendilhação, cedência das armaduras e máxima

A fendilhação do betão tracionado ocorre apenas nas faixas de laje reforçadas que não foram sujeitas previamente aos ensaios de pré-fendilhação. Comparativamente com a faixa de laje que serviu de referência, o reforço permite aumentar a carga para a qual a fendilhação do betão tracionado se inicia. Esta carga foi bastante próxima para as três faixas de laje em causa. Os valores obtidos foram de 10.86 kN, 10.52 kN e 10.86 kN respetivamente para as faixas de laje em que os adesivos 1, 2 e 3 foram utilizados, o que representa um aumento médio de 42% relativamente à faixa de laje de referência (ver Tabela 4.1 e Figura 4.11). Assim, poder-se-á concluir que na fase elástica, o comportamento deste tipo de elementos de betão reforçados com

laminados de CFRP inseridos não está muito relacionado com o tipo de adesivo utilizado na ligação do laminado ao betão, em virtude, muito provavelmente, de para este nível de carga apresentarem comportamento similar. Por outro lado, o reforço tem pouca influência no comportamento durante a fase elástica, uma vez que a sua área homogeneizada em betão é reduzida.

Quanto à rigidez elástica apresentada pelas faixas de laje nesta fase, é notório um incremento resultante do reforço, mais pronunciado no caso do adesivo 1, sendo o incremento menor no adesivo 2 e ainda menor no adesivo 3 (ver Tabela 4.1). Este comportamento poderá estar associado à rigidez de cada epóxi.

Em termos de flecha a meio vão, os valores obtidos são ainda bastante reduzidos e todos bastante próximos, sendo que comparativamente com a faixa de laje de referência, a fendilhação ocorre para maiores valores de deslocamento vertical a meio vão.



Notas: os valores de força no início da fendilhação do betão tracionado apresentados em (a) para as lajes pré-fendilhadas correspondem aos valores obtidos no ensaio de pré-fendilhação. Os valores entre parêntesis são o aumento percentual de carga relativo à faixa de laje de referência para esta fase do ensaio.

Figura 4.11 – Cargas de fendilhação do betão (a) e plastificação das armaduras (b).

No momento da plastificação das armaduras de tração, quer para a série não pré-fendilhada, quer para série pré-fendilhada, os valores de carga registados para os casos em que os adesivos 1 e 2 são usados não são significativamente diferentes; no entanto, tipicamente no caso do uso do adesivo 1, os valores de carga são ligeiramente superiores. Comparativamente com a faixa de laje de referência, na série não pré-fendilhada, o incremento em termos de carga

correspondente à plastificação das armaduras foi de 49% e 45% respetivamente para as faixas de laje reforçadas utilizando os adesivos 1 e 2 sem pré-fendilhação. Por sua vez, na laje reforçada com o adesivo 3, a plastificação das armaduras ocorre para menores valores de carregamento (incremento de 27% na faixa de laje sem pré-fendilhação). Em termos de deslocamento vertical a meio vão, em correspondência com os valores da carga aplicada, também para as lajes reforçadas com a aplicação dos adesivos 1 e 2, os valores registados foram semelhantes, enquanto os valores registados com o uso do adesivo 3 foram inferiores aos dois casos anteriores.

Relativamente aos aspetos relacionados com a pré-fendilhação, na faixa de laje SL_ADH1_C observou-se um incremento em termos de carga de plastificação das armaduras de 47% enquanto que para a laje SL_ADH2_C o aumento foi de 42%. No caso da utilização do adesivo 3 (SL_ADH3_C), o incremento percentual em termos de carga foi bastante reduzido (apenas 15%) quando comparado com os anteriores, o que mostra que a pré-fendilhação provocou efeitos negativos no comportamento com este adesivo já que relativamente à faixa de laje em que não existe pré-fendilhação a carga nesta fase sofre um decréscimo de 44%, ao contrário das lajes com os adesivos 1 e 2 que sofrem decréscimos de carga de plastificação das armaduras de 1.1% e 2.1% respetivamente. Esta leve diminuição nas cargas de cedência das armaduras poderá estar relacionada com a existência de alguma deformação residual associada a extensões residuais internas (não recuperadas) no aço das armaduras longitudinais inferiores, o que faz com que a sua eficiência seja ligeiramente menor.

Salienta-se ainda o facto de as deformações verticais a meio vão verificadas no momento da cedência das armaduras para estas lajes serem inferiores às verificadas no caso da inexistência de danos de fendilhação do betão tracionado, sendo mesmo inferiores às da faixa de laje que serviu de referência, facto este muito provavelmente relacionado com a não contabilização da flecha resultante da pré-fendilhação. A observação anterior foi ainda mais pronunciada no caso da utilização do adesivo 3 (situação concordante com os níveis de carga).

Em termos de rigidez à flexão em fase fendilhada (K_{II}), na série não pré-fendilhada e durante a fase que se estende desde a fendilhação do betão até à cedência das armaduras, numa fase inicial, rigidez apresentada não é constante provavelmente devido ao processo de formação de fendas. Após a estabilização das fendas (em número e não em largura), há uma tendência para

as faixas de laje pré-fendilhadas e não pré-fendilhadas apresentarem valores de rigidez idênticos. Na série pré-fendilhada, no início do ensaio, a rigidez apresentada pela faixa de laje é inferior à apresentada nos casos em que o betão se encontra intacto (K_I), fruto do dano provocado pelas operações de pré-fendilhação do betão, sendo que nesta série apenas existe este estado (K_{II}) logo desde o início da imposição do deslocamento constante a meio vão. Por outro lado, na série pré-fendilhada, inicialmente a rigidez é maior quando comparada com aquela verificada pouco antes da cedência das armaduras, o que poderá resultar da fendilhação não ser total no processo de pré-fendilhação, existindo lugar a nova abertura de fendas ao longo do ensaio, diminuindo a rigidez. Este facto é evidente nos padrões de fendilhação no final do ensaio para as lajes pré-fendilhadas (ver Figura 4.4).

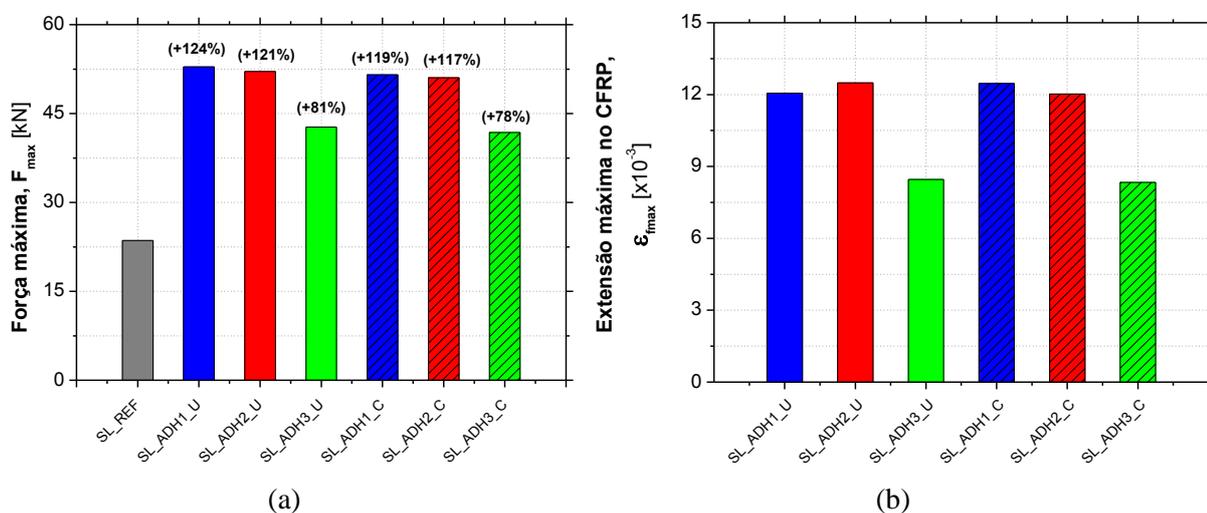
Ao contrário do que foi verificado no momento da fendilhação do betão, até esta fase pode concluir-se que existe já alguma influência nos padrões de comportamento devido ao adesivo utilizado, bem como alguma influência da pré-fendilhação, sobretudo no caso das lajes SL_ADH3.

Com exceção das faixas de laje reforçadas na presença do adesivo 3, o comportamento obtido é similar na fase que vai desde a cedência das armaduras de tração e o registo da carga máxima. Neste contexto, nos parágrafos que se seguem sustenta-se esta constatação.

A rigidez observada pós-cedência das armaduras de flexão (K_{III}), nos casos das lajes SL_ADH1 e SL_ADH2, é praticamente igual para todos os casos. No caso das lajes SL_ADH3, os valores apresentados na Tabela 4.1 foram calculados com base no comportamento observado até ao momento em que há uma alteração da curvatura na resposta $F - \delta$ da Figura 4.1. Os valores verificados para este caso são inferiores àqueles que se obtiveram no caso das lajes SL_ADH1 e SL_ADH2, concluindo-se que a rigidez à flexão conferida com o uso do adesivo 3 é cerca de 16% inferior à rigidez média proporcionada pelos outros dois adesivos.

Na Figura 4.12(a) são apresentadas as cargas máximas registadas para cada faixa de laje, bem como os aumentos percentuais relativos à faixa de laje de referência. No caso das faixas de laje SL_ADH1_U e SL_ADH2_U os valores de carga máxima foram bastante similares (respetivamente 52.87 kN e 52.08 kN), o que representa um aumento percentual relativo à faixa de laje de referência de respetivamente 124% e 121%, ou seja para mais do dobro. Quanto à

faixa de laje SL_ADH3_U, o valor registado foi de 42.71 kN, sendo o incremento em termos da carga máxima inferior aos anteriores, com cerca de 81%, o que representa uma capacidade de carga 18% inferior à capacidade média obtida com a utilização dos dois outros adesivos. No caso da existência de pré-fendilhação, os valores obtidos são ligeiramente menores (SL_ADH1_C – 51.53 kN; SL_ADH2_C – 51.06 kN; SL_ADH3_C – 41.82 kN), com aumentos de 119%, 117% e 78% respetivamente. À semelhança do observado no caso da ausência de pré-fendilhação, o adesivo 3 tem pior desempenho do que os dois restantes, apresentado capacidade de carga também 18% inferior à capacidade de carga média das duas faixas de laje reforçadas com os dois outros adesivos em estudo. Desta forma, o incremento de carga foi superior no caso da utilização dos adesivos 1 e 2, em que o adesivo foi mobilizado até à rotura do laminado, ao contrário do reforço com o adesivo 3 em que a capacidade resistente do laminado não foi completamente explorada, não existindo rotura por esgotamento da capacidade resistente deste. Assim, a extensão máxima no laminado de CFRP (ver Figura 4.12(b)) é bastante superior nas lajes SL_ADH1 e SL_ADH2 comparativamente com as faixas de laje SL_ADH3 (a média das extensões máximas no laminado com a utilização do adesivo 3 é 32% inferior à media das extensões verificadas com o uso dos adesivos 1 e 2) em que apenas houve deslizamento e não rotura (ver Figura 4.2).



Nota: os valores entre parêntesis são o aumento de carga percentual relativo à faixa de laje de referência para esta fase.

Figura 4.12 – Valores máximos: (a) forças aplicadas; (b) extensão máxima no laminado de CFRP.

Em termos de influência da pré-fendilhação, não houve lugar a alterações significativas na carga máxima, sendo as diferenças percentuais relativas à faixa de laje de referência de 5.7%, 4.3% e 3.8% respetivamente para as faixas de laje SL_ADH1, SL_ADH2 e SL_ADH3. No mesmo

sentido, em termos de extensões máximas no laminado, os valores para as duas séries são idênticos. A explicação para este fenómeno pode residir no facto de no momento da rotura apenas existir a ação conjunta do betão comprimido, do laminado de CFRP e do aço em cedência, o que de alguma forma justifica a proximidade de valores obtidos quer para a carga máxima, quer para a extensão máxima do laminado de CFRP.

De salientar que a baixa influência da pré-fendilhação na máxima capacidade de carga de faixas de laje é um aspeto comum a outros estudos presentes na literatura (e.g. Dias *et al.* (2004)). No entanto há um facto evidente, os valores de flecha registados para as cargas máximas na presença dos diferentes adesivos são algo inferiores no caso da existência de pré-fendilhação.

4.6.2 Ductilidade e resposta pós-pico

A Figura 4.13(a) apresenta os valores do parâmetro de ductilidade expresso pelo rácio δ_{\max}/δ_y , em que δ_{\max} e δ_y correspondem, respetivamente, aos deslocamentos verticais a meio vão registados para F_{\max} e F_y . Os valores obtidos são bastante razoáveis quando comparados com os obtidos em estudos semelhantes em que foram utilizadas outras técnicas de colagem de laminados de CFRP (e.g. Sena-Cruz *et al.* (2012)). No caso das faixas de laje em que não existe pré-fendilhação, os valores são bastante próximos, não existindo diferenças significativas entre adesivos.

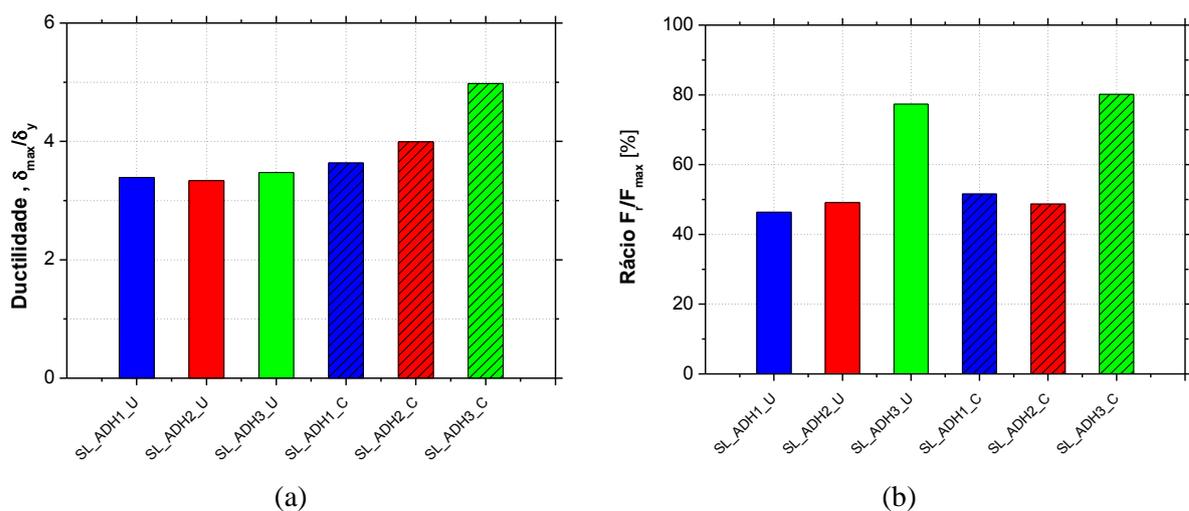


Figura 4.13 – Valores do parâmetro de ductilidade (a) e relação entre a força residual e a força máxima que a faixa de laje é capaz de suportar (b).

Comparando a série não pré-fendilhada com aquela em que houve lugar a pré-fendilhação prévia ao reforço, a ductilidade foi ligeiramente superior no segundo caso para as faixas de laje SL_ADH1 e SL_ADH2, sendo a diferença mais significativa nas faixas de laje SL_ADH3. Desta forma, verificou-se uma tendência para a pré-fendilhação aumentar os níveis de ductilidade. Este aspeto pode resultar da não contabilização da flecha vertical a meio vão acumulada do ensaio de pré-fendilhação nos valores de δ_y e δ_{max} , apresentados quer na Tabela 4.1, quer nas curvas da Figura 4.1. Se esse valor fosse contabilizado, os valores do rácio δ_{max}/δ_y aproximam-se dos obtidos para a serie não pré-fendilhada, sendo a ductilidade observada praticamente independente da existência ou não de pré-fendilhação.

Um facto diferenciador entre a resposta $F - \delta$ observada com os adesivos 1 e 2, comparativamente com a resposta obtida com o uso do adesivo 3, consiste no comportamento entre as fases de plastificação das armaduras e carga máxima verificado para as faixas de laje em que este último adesivo foi utilizado para reforço. A partir de cerca de 50 mm de deformação vertical a meio vão, o comportamento à flexão deixa de ser aproximadamente linear, em resultado da resposta depender essencialmente do comportamento do laminado de CFRP, passando a rigidez à flexão a decrescer progressivamente até ao ponto de carga máxima. Este facto poderá ter sido provocado pelo incremento do deslizamento do laminado de CFRP e desagregação do adesivo verificada nas faixas de laje SL_ADH3 (ver Figura 4.2) que já se vinha verificando em fases anteriores do ensaio. Desta forma, a porção de rigidez à flexão conferida pela ação do sistema NSM-CFRP sofre um decréscimo progressivo a partir deste momento. Devido ao deslizamento do laminado, fica evidente a ineficácia do adesivo 3 em transferir esforços entre os materiais, não sendo este capaz de mobilizar as propriedades resistentes do laminado.

Ao contrário do que acontece nas lajes SL_ADH1 e SL_ADH2, no caso das SL_ADH3, a queda da força aplicada após o registo de F_{max} processa-se de forma suave ao longo do aumento da deformação imposta, sendo este aspeto favorável para o comportamento de uma estrutura num caso real. A partir de cerca de 100 mm no caso da inexistência de pré-fendilhação e 80 mm quando esta está presente existe uma tendência para o decréscimo de carga estabilizar, aproximando-se mais lentamente do comportamento da laje de referência. Tal poderá dever-se ao facto dos danos no adesivo estabilizarem, sendo apenas o atrito ainda existente entre o laminado e o adesivo o responsável pela diferença de comportamento entre estas faixas de laje

e a faixa de laje que serviu de referência. Denota-se um pequeno decréscimo na força durante esta fase, provavelmente devido a pequenas degradações que vão ocorrendo no adesivo ao longo do tempo.

De forma a caracterizar as diferenças em termos de capacidade de carga após a carga máxima, foi adotado um parâmetro que estabelece a razão entre a força residual no final do ensaio e a força máxima observada em cada faixa de laje. Os valores escolhidos para as forças residuais envolvidas no parâmetro são os registados no momento em que a força aplicada tende a estabilizar na fase de pós-pico. Na Figura 4.13(b) são apresentados os valores obtidos para o parâmetro anterior. Esta relação é substancialmente maior no caso do adesivo 3, comparativamente com os adesivos 1 e 2, como já era de esperar pelos aspetos de comportamento descritos anteriormente.

4.7 Conclusões

Foi realizado um programa experimental com vista a avaliar o comportamento à flexão de faixas de laje em função do tipo de adesivo utilizado para o reforço segundo a técnica NSM e da existência ou não de pré-fendilhação. Em termos do comportamento à flexão observado as seguintes conclusões podem ser retiradas:

- O reforço aumenta a capacidade de carga das faixas de laje;
- As cargas para as quais se dá a fendilhação do betão na série não pré-fendilhada não são significativamente influenciadas pelo tipo de adesivo utilizado;
- No momento da plastificação das armaduras denota-se já alguma influência do tipo de adesivo nos valores obtidos para a carga registada;
- Os adesivos 1 e 2 proporcionam uma capacidade de carga máxima para as faixas de laje semelhante. Com o uso do adesivo 3 a capacidade de carga é menor;
- A resposta das faixas de laje não é significativamente diferente com a existência de pré-fendilhação, exceto na primeira fase, uma vez que o betão já se encontra em estado fendilhado;
- Com o uso do adesivo 3, as capacidades resistentes do laminado de CFRP não são completamente exploradas, uma vez que este não chega a romper;

- A ductilidade observada foi semelhante entre adesivos na série não pré-fendilhada, no entanto há tendência para a pré-fendilhação aumentar a ductilidade sobretudo no reforço com o adesivo 3;
- A resposta pós carga máxima é diferente nas faixas de laje em que o adesivo 3 foi utilizado, comparativamente com os adesivos 1 e 2;
- A abertura de fenda tende a ser superior na série não pré-fendilhada, sendo praticamente igual com o uso dos adesivos 1 e 2 e superior quando o adesivo 3 é utilizado;
- O padrão de fendilhação é alterado com a introdução do reforço: há lugar ao aumento da banda de fendilhação e à diminuição do espaçamento médio entre fendas, sendo esta diminuição menos pronunciada no caso do adesivo 3. Na série pré-fendilhada esta banda tende a ter maior largura, com exceção das lajes reforçadas utilizando o adesivo 3 em que foi praticamente igual nas duas séries;
- A fendilhação do tipo espinha de peixe (*herringbone*) é apenas visível nos adesivos 1 e 2, sendo aparentemente inexistente nas faixas de laje reforçadas com o adesivo 3.

CAPÍTULO 5

SIMULAÇÕES – ANÁLISE NUMÉRICA

No Capítulo 3 foram apresentados e analisados os resultados dos ensaios de arranque direto. Tendo como ponto de partida esses resultados, no presente capítulo, são efetuadas simulações numéricas das respostas obtidas experimentalmente. Estas simulações têm como objetivo principal a determinação da lei de corte local, fundamental para o estudo da aderência de sistemas NSM-CFRP. Para o efeito foi utilizado um *software* inicialmente desenvolvido por (Sena-Cruz, 2005). Assim, neste capítulo são apresentados os princípios de funcionamento do programa de cálculo utilizado para o estudo da aderência entre os laminados de CFRP e o betão, bem como os resultados numéricos obtidos. Por fim, é efetuada uma análise das simulações realizadas.

O modelo analítico utilizado no presente trabalho para obtenção da lei local de tensão de corte *versus* deslizamento ($\tau - s$) tendo vindo a ser usado em várias áreas, tendo revelado boa capacidade de modelação de resultados experimentais. Particularmente em ensaios de arranque direto, esta metodologia foi utilizada na ligação de laminados de CFRP ao betão (Sena-Cruz, 2005; Sena Cruz *et al.*, 2006), na ligação de varões de aço galvanizado ao betão (Sena-Cruz *et al.*, 2009) e na ligação entre laminados de CFRP e painéis de madeira constituídos por lâminas de madeira coladas entre si (Sena-Cruz *et al.*, 2013).

O fenómeno local de aderência entre dois materiais (no presente caso entre o laminado de CFRP e o adesivo) tem vindo a ser caracterizado matematicamente por intermédio uma equação diferencial de segunda ordem. Com base nesta equação é possível obter a lei local recorrendo a uma análise inversa. Assim, na metodologia proposta por Sena-Cruz (2005), são realizadas uma série de iterações de forma a encontrar uma lei de tensão de corte *versus* deslizamento do laminado ($\tau - s$) que seja capaz de satisfazer a equação diferencial de segunda ordem que rege o fenómeno local da aderência. Desta forma, é possível determinar a força de arranque (N) e assim comparar a resposta numérica $(N - s)_{Num}$ obtida utilizando os parâmetros arbitrados para a lei $\tau - s$, com a resposta experimental $(N - s)_{Exp}$. A resposta $(N - s)_{Num}$ é controlada pelos parâmetros definidores da lei $\tau - s$. No caso de a resposta não ser satisfatória, arbitram-se novos parâmetros definidores da lei $\tau - s$ até se obter uma resposta numérica $(N - s)_{Num}$

satisfatória. Mais informação sobre o assunto pode ser encontrada nas publicações de Cruz e Barros (2004) e Sena Cruz *et al.* (2006).

5.1 Modelo analítico para a lei local tensão de corte *versus* deslizamento

5.1.1 Equação diferencial regente do fenómeno da aderência

Assumindo que o laminado de CFRP tem comportamento linear elástico na sua direção longitudinal e que as deformações do adesivo e do betão não têm influência na determinação do deslizamento, i.e. são desprezáveis face ao deslizamento ocorrido ao nível da interface CFRP-adesivo, a equação diferencial de segunda ordem que rege o fenómeno local de aderência de laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento é dada por (Sena-Cruz, 2005):

$$\frac{d^2s}{dx^2} = \frac{P_f}{E_f A_f} \cdot \tau(x) \quad (5.1)$$

onde $\tau(x) = \tau[s(x)]$ é a tensão de corte na superfície de contacto entre o laminado de CFRP e o adesivo ao longo do comprimento de ancoragem. Esta é variável ao longo do comprimento de ancoragem e depende também do deslizamento entre o laminado de CFRP e o adesivo, $s(x)$. A origem do eixo x coincide com a extremidade livre do comprimento de ancoragem e E_f , A_f e P_f são, respetivamente, o módulo de elasticidade, a área da secção transversal e o perímetro do laminado de CFRP.

5.1.2 Relação entre a força de arranque e o deslizamento

Na Figura 5.1 apresenta-se um laminado de CFRP introduzido no betão num comprimento de ancoragem L_b , onde N é o esforço axial no laminado de CFRP, e s_f e s_l são, respetivamente, o deslizamento na extremidade livre e carregada. Durante o deslizamento do laminado de CFRP devido a uma força aplicada (\bar{N}), as seguintes funções podem ser avaliadas ao longo do comprimento de ancoragem: deslizamento ao longo do laminado, $s(x)$; tensão de corte, $\tau(x)$; extensão no CFRP, $\varepsilon(x)$; e esforço axial ao longo do comprimento de ancoragem do CFRP, $N(x)$. A força de arranque é dada pela equação (5.2) obtida através da igualdade entre o trabalho

interno e externo produzido, respetivamente, pela deformação elástica do laminado e pelo campo de tensões gerado na interface do laminado de CFRP (Sena-Cruz *et al.*, 2009).

$$N = \sqrt{2E_f \cdot A_f \cdot P_f \cdot \int_{s_f}^{s(x=L_b)} \tau(s) \cdot ds} \quad (5.2)$$

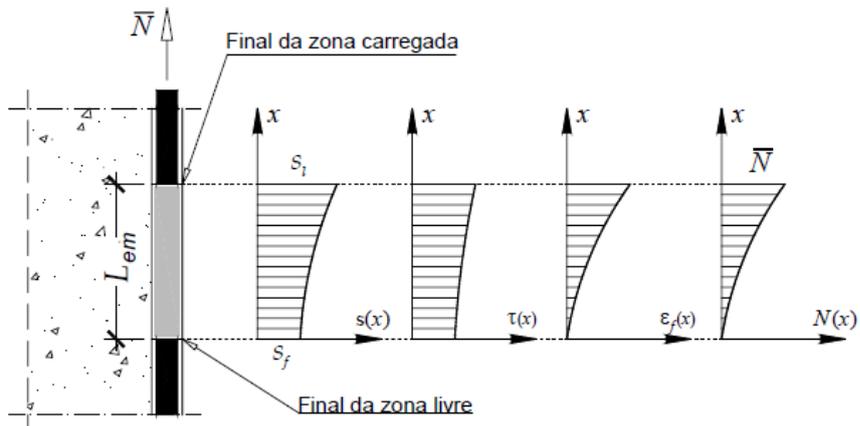


Figura 5.1 – Entidades envolvidas no modelo numérico (Adaptado de Sena-Cruz (2005))

5.1.3 Expressões analíticas para a relação tensão de corte *versus* deslizamento

No presente estudo, foram usados dois tipos de leis locais de tensão de corte *versus* deslizamento ($\tau - s$). Para a simulação dos provetes reforçados com os adesivos 1 e 2 (ver Capítulos 2 e 3) utilizou-se a equação (5.3), proposta por Cruz e Barros (2004), enquanto que para os provetes referentes ao adesivo 3 foi utilizada a equação (5.4), do CEB-FIP (1993), uma vez que a equação (5.3) não permitia obter uma resposta $(N - s)_{Num}$ adequada à resposta $(N - s)_{Exp}$ na simulação das séries ADH3.

- Adesivos 1 e 2

$$\tau(s) = \begin{cases} \tau_m \left(\frac{s}{s_m} \right)^\alpha & \text{se } s \leq s_m \\ \tau_m \left(\frac{s}{s_m} \right)^{-\alpha'} & \text{se } s > s_m \end{cases} \quad (5.3)$$

- Adesivo 3

$$\tau(s) = \begin{cases} \tau_m \left(\frac{s}{s_1}\right)^\alpha & \text{se } 0 \leq s \leq s_1 \\ \tau_m & \text{se } s_1 \leq s \leq s_2 \\ \tau_m - (\tau_m - \tau_f) \left(\frac{s - s_2}{s_3 - s_2}\right) & \text{se } s_2 \leq s \leq s_3 \\ \tau_f & \text{se } s \leq s_3 \end{cases} \quad (5.4)$$

Nestas equações τ_m e s_m são, respetivamente, a tensão máxima de corte e o correspondente deslizamento. Na equação (5.3), α e α' são parâmetros que definem a forma da curva. O primeiro define a forma do ramo pré-pico (ascendente), enquanto o segundo modela a forma do ramo pós-pico (descendente). No caso da equação (5.4), α tem o mesmo significado que na equação (5.3), enquanto que s_1, s_2, s_3 são, respetivamente, os deslizamentos no final do ramo ascendente, patamar e ramo descendente. Finalmente τ_f representa a tensão residual devido a mecanismos de atrito. A Figura 5.2 apresenta o comportamento típico da leis locais tensão de corte *versus* deslizamento utilizadas.

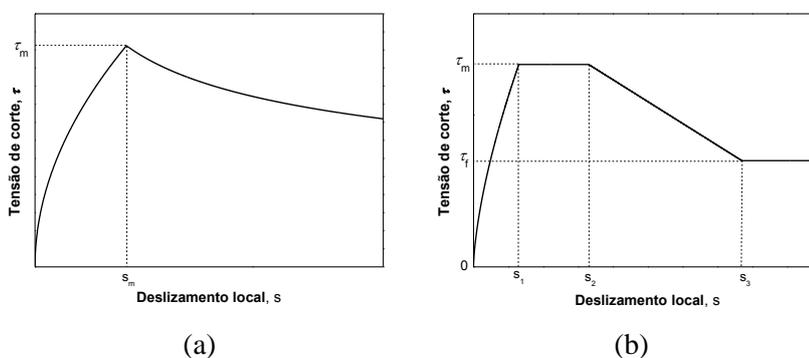


Figura 5.2 – Aspeto típico da lei local $\tau - s$: (a) lei utilizada para simulação dos provetes reforçados com os adesivos 1 e 2; (b) lei utilizada para simulação dos provetes reforçados com o adesivo 3.

5.2 Resultados obtidos nas simulações

As leis locais de tensão de corte *versus* deslizamento foram calibradas utilizando as curvas médias experimentais força *versus* deslizamento na extremidade carregada, segundo o processo descrito na Secção 5.1. Assim, os valores dos parâmetros $s_m, \tau_m, \alpha, \alpha'$ para os casos em que os

adesivos 1 e 2 foram utilizados e $s_1, s_2, s_3, \tau_m, \tau_r$ e α foram determinados através da estratégia de análise inversa.

Inicialmente procuraram-se ajustar os valores dos parâmetros de modo a obterem-se às tensões de corte máximas e respetivos deslizamentos próximos dos experimentais. Uma vez fixos estes parâmetros, os restantes foram ajustados. Este processo foi repetido de forma iterativa até se obterem valores erro entre as curvas numéricas e experimentais aceitáveis (os menores possíveis).

Das simulações efetuadas foi possível concluir que a máxima força de arranque é controlada pelo valor de τ_m , enquanto o valor do deslizamento correspondente à máxima força é controlado pelo parâmetro s_m , no caso dos provetes reforçados com os adesivos 1 e 2. Tal constatação já tinha também sido observada por (Sena-Cruz (2005)). Quanto aos provetes em que o adesivo 3 foi usado, s_1 e s_2 controlam o deslizamento correspondente ao início e fim do patamar em que a força de arranque se encontra aproximadamente constante, enquanto s_3 controla o deslizamento a partir do qual a força de arranque apresenta valores residuais (ver Figura 5.6 e Figura 5.7). Por sua vez, o parâmetro α controla a forma do ramo pré-pico na resposta numérica, enquanto α' controla sobretudo a forma do ramo pós-carga máxima. Este parâmetro tem também uma importância significativa para a forma do ramo pré-pico, uma vez que neste ramo existem zona do comprimento de ancoragem onde a lei da interface já se encontram no ramo de “amolecimento”.

As propriedades geométricas utilizadas para os laminados de CFRP foram, no caso do laminado de secção transversal $10 \times 1.4 \text{ mm}^2$, respetivamente para a área da secção transversal (A_f) e para o perímetro do laminado (P_f) iguais a 14.0 mm^2 e 22.8 mm . Para o laminado de 20 mm de largura, a área da secção utilizada foi de 28.0 mm^2 enquanto o perímetro foi de 42.8 mm . Por sua vez, para o módulo de elasticidade o valor adotado foi de 165 GPa .

Da Figura 5.3 até à Figura 5.7 apresentam-se a resposta numérica (linha fina) e a respetiva envolvente experimental (área sombreada) em termos de força de arranque *versus* deslizamento no final da zona carregada. Desde a Tabela 5.1 até à Tabela 5.3 são apresentados os valores dos parâmetros obtidos para as leis $\tau - s$, com base na análise inversa efetuada. Nestas tabelas também se inclui o erro normalizado (Err). Este valor é definido como a diferença entra as

áreas das curvas numéricas e experimentais, dividida pela área de curva experimental. Com exceção das curvas correspondentes às séries ADH1_L20_Lb300, ADH2_L20_Lb80 ADH2_L20_Lb200, ADH2_L20_Lb300, pode concluir-se que de uma forma geral o modelo o modelo numérico simula com rigor suficiente os resultados experimentais (ver Tabela 5.2).

Tal como já foi discutido no Capítulo 3, nas séries ADH1_L20 e ADH2_L20 existe uma tendência, nas curvas $F_l - s_l$, para o crescimento da força aplicada num fase inicial seguindo-se uma outra fase em que a carga aplicada permanece praticamente constante. Deste modo, nas referidas séries, e dada a elevada curvatura inicial das curvas $F_l - s_l$, a simulação utilizando a lei constitutiva descrita através da equação (5.3) conduz a simulações que menor rigor, o que explica o elevado valor obtido para o erro normalizado nas simulações efetuadas para as séries ADH1_L20_Lb300, ADH2_L20_Lb80, ADH2_L20_Lb200 e ADH2_L20_Lb300 (ver Tabela 5.2).

Quanto às séries relativas ao uso do adesivo 3 (ADH3), a resposta numérica obtida distingue-se claramente das restantes, em virtude da utilização da lei local de tensão de corte *versus* deslizamento utilizada.

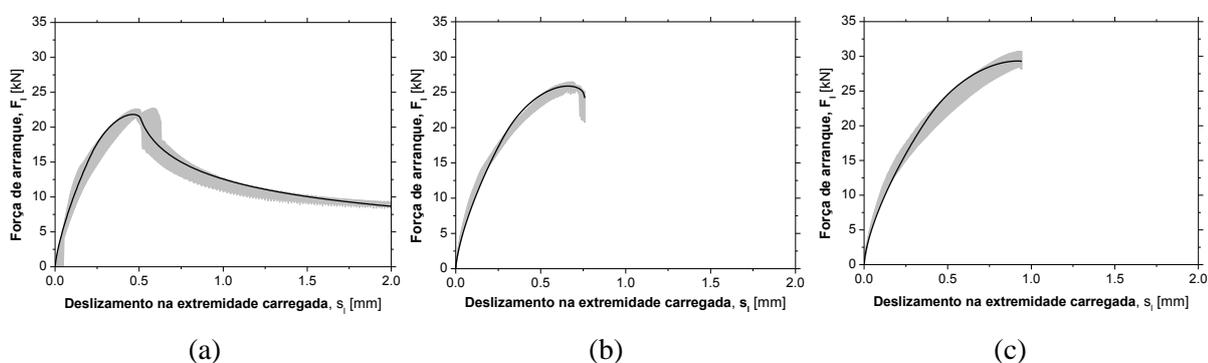


Figura 5.3 – Simulação das séries ADH1_L10_Lb60 (a), ADH1_L10_Lb80 (b) e ADH1_L10_Lb100 (c).

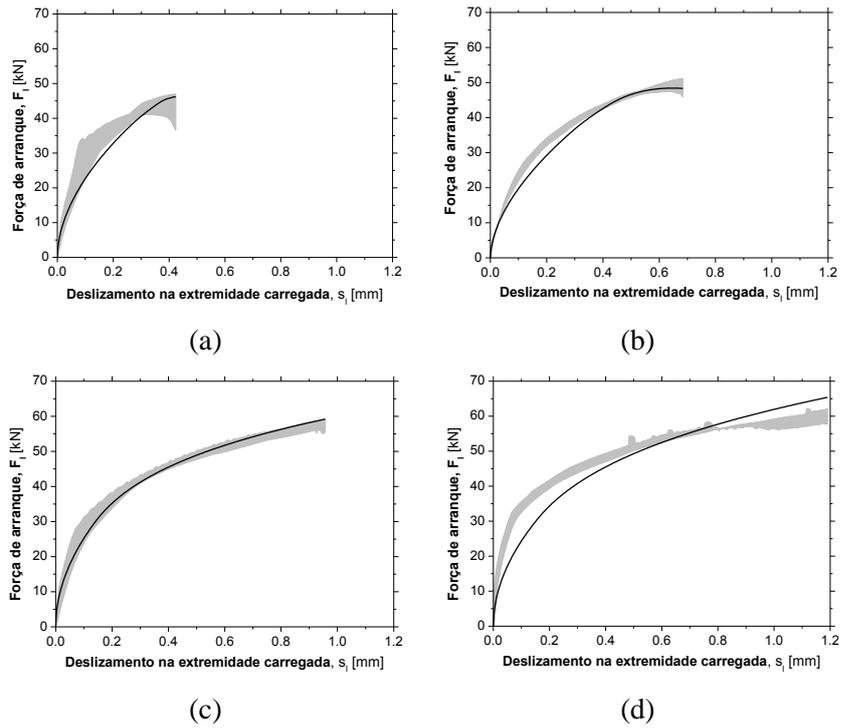


Figura 5.4 – Simulação das séries ADH1_L20_Lb80 (a), ADH1_L20_Lb100 (b), ADH1_L20_Lb200 (c) e ADH1_L20_Lb300 (d).

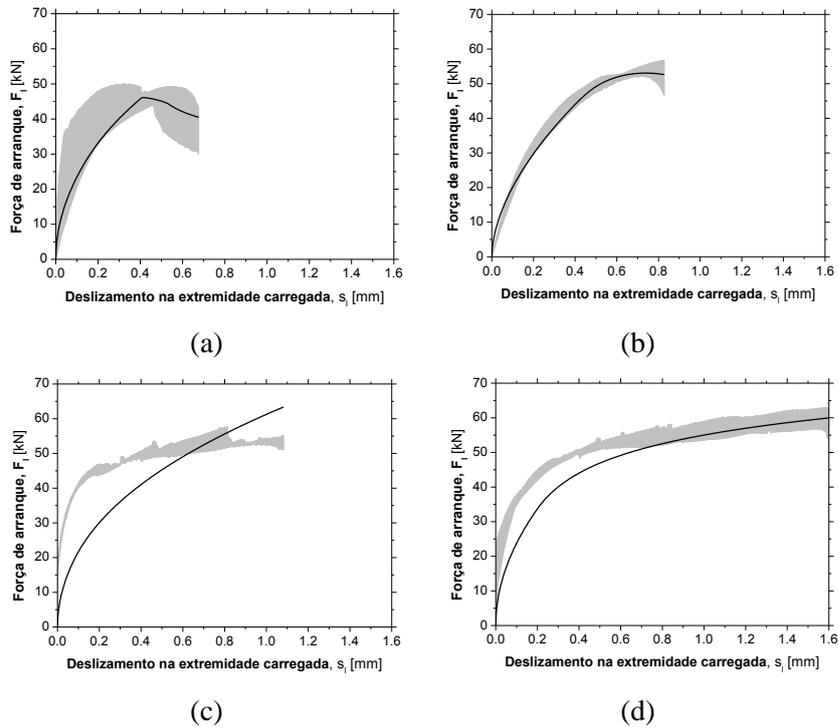


Figura 5.5 – Simulação das séries ADH2_L20_Lb80 (a), ADH2_L20_Lb100 (b), ADH2_L20_Lb200 (c) e ADH2_L20_Lb300 (d).

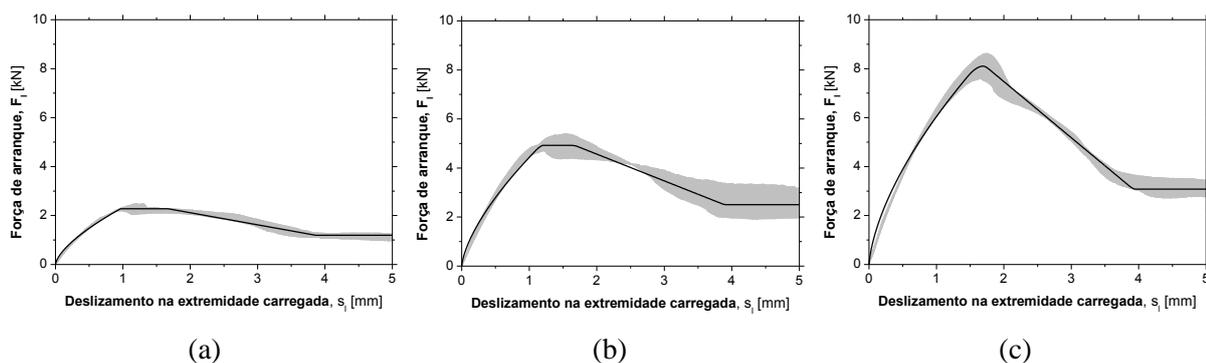


Figura 5.6 – Simulação das séries ADH3_L10_Lb50 (a), ADH3_L10_Lb100 (b) e ADH3_L100_Lb150 (c).

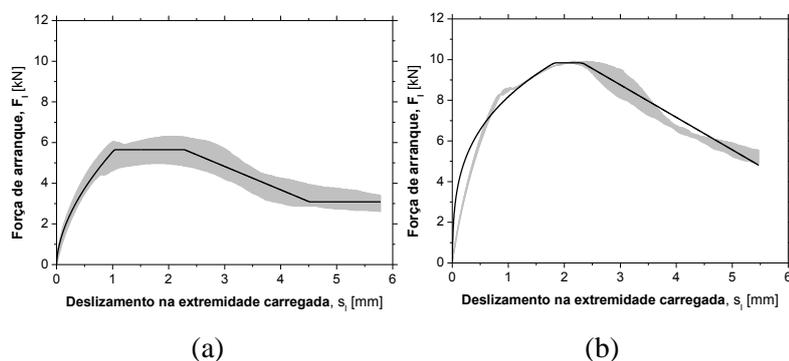


Figura 5.7 – Simulação das séries ADH3_L20_Lb80 (a), ADH3_L20_Lb100 (b).

Tabela 5.1 – Valores dos parâmetros que definem a lei $\tau - s$ utilizando o adesivo 1.

Provete	s_m [mm]	τ_m [MPa]	α [-]	α' [-]	Err. [%]
ADH1_L10_Lb60	0.21	18.35	0.50	0.48	4.63
ADH1_L10_Lb80	0.28	16.35	0.40	0.55	3.28
ADH1_L10_Lb100	0.37	15.00	0.35	0.46	3.55
ADH1_L20_Lb80	0.25	14.80	0.07	0.48	3.45
ADH1_L20_Lb100	0.29	12.80	0.13	0.47	3.96
ADH1_L20_Lb200	0.14	16.30	0.01	0.60	1.92
ADH1_L20_Lb300	0.16	15.20	0.01	0.50	7.53

Tabela 5.2 – Valores dos parâmetros que definem a lei $\tau - s$ utilizando o adesivo 2.

Provete	s_m [mm]	τ_m [MPa]	α [-]	α' [-]	Err. [%]
ADH2_L20_Lb80	0.14	14.12	0.01	0.16	7.08
ADH2_L20_Lb100	0.39	13.80	0.13	0.53	2.17
ADH2_L20_Lb200	0.08	12.00	0.01	0.15	16.9
ADH2_L20_Lb300	0.20	14.50	0.01	0.97	6.88

Tabela 5.3 – Valores dos parâmetros que definem a lei $\tau - s$ utilizando o adesivo 3.

Provete	s_1 [mm]	s_2 [mm]	s_3 [mm]	τ_m [MPa]	τ_f [MPa]	α [-]	Err. [%]
ADH3_L10_Lb50	0.65	1.65	3.85	2.00	1.05	0.65	2.34
ADH3_L10_Lb100	1.10	1.60	3.85	2.16	1.10	0.65	2.31
ADH3_L10_Lb150	1.45	1.50	3.85	2.40	0.90	0.60	2.10
ADH3_L20_Lb80	1.00	2.25	4.50	1.65	0.90	0.56	2.28
ADH3_L20_Lb100	1.25	2.25	5.50	2.30	1.10	0.30	4.04

Analisando os resultados obtidos e apresentados desde a Figura 5.3 até à Figura 5.7 e da Tabela 5.1 à Tabela 5.3, algumas conclusões podem ser extraídas. Na simulação da série ADH1_L10, é clara a tendência de crescimento do valor de s_m e diminuição do valor de τ_m com o aumento do comprimento de ancoragem. Quanto ao valor de α , este tende a crescer com o aumento do valor de L_b , o que indica que o ramo ascendente da curva $F_l - s_l$ tem uma concavidade cada vez menos pronunciada. Quanto ao valor de α' , não existe uma tendência clara, provavelmente relacionada com a inexistência de resposta experimental pós-pico no caso dos comprimentos de 80 mm e 100 mm. Em termos de valor do erro normalizado, pode afirmar-se que os valores obtidos foram aceitáveis.

A análise para as séries ADH1_L20 e ADH2_L20 é complexa, dada a disparidade de resultados. Quanto aos comprimentos de 80 mm e 100 mm, observa-se a mesma tendência em termos dos valores de s_m e τ_m que foi verificada no caso de ADH1_L10. Já quanto aos valores de α e α' a situação é diferente. O parâmetro α tende a crescer com o incremento de L_b , enquanto para α' não existe uma tendência clara. Contudo, para estes casos, o valor do erro normalizado tomou valores aceitáveis à exceção da série ADH2_L20_Lb80, em que o ajuste do ramo pré-pico na resposta numérica foi difícil dada a elevada curvatura da resposta experimental para esta fase. Este aspeto implicou a adoção do valor 0.01 para o parâmetro α na simulação deste provete, o que não é comum neste tipo de análise.

As séries ADH1_L20 e ADH2_L20 com comprimentos de ancoragem de 200 mm e 300 mm, conduziram a valores elevados para o erro normalizado, não podem ser retiradas conclusões efetivas. Exceção verificou-se para a série ADH1_L20_Lb200 em que o erro foi aceitável. A discrepância destes valores certamente está relacionada com a lei local adotada, que muito possivelmente, não seria a mais adequada.

As simulações realizadas para os provetes em que o adesivo 3 foi utilizado, constata-se que os valores τ_m são significativamente mais baixos, quando comparados com aqueles que foram obtidos para as simulações dos provetes em que os adesivos 1 e 2 foram usados, fruto da menor eficiência deste adesivo. Por outro lado, s_1 toma valores bem mais elevados que s_m para os provetes reforçados com os adesivos 1 e 2, o que é fruto do menor módulo de elasticidade do adesivo 3. Em termos do erro normalizado, todas as simulações conduziram a valores aceitáveis. Observa-se a tendência de τ_m crescer com o crescimento do valor de L_b , ao contrário do verificado nas simulações relativas aos provetes em que os adesivos 1 e 2 foram utilizados. Esta observação poderá estar relacionada com o facto de este adesivo mobilizar a ligação com tensões de corte sensivelmente constantes ao longo do L_b , situação que não acontece com a utilização de adesivos de maior módulo de elasticidade. Quanto à extensão do patamar de tensão de corte constante tende a ser superior para os menores comprimentos de ancoragem, o que faz com que o intervalo de valores de deslizamento local compreendido entre s_1 e s_2 seja superior nas simulações efetuadas para os menores comprimentos de ancoragem. Para o parâmetro τ_f não se obteve uma tendência clara de evolução dos valores. Por fim, os valores do parâmetro α são bastante estáveis, exceção para a simulação relativa da série ADH3_L20_Lb100 em que devido à opção de simular os dois ramos pré-pico existentes com o primeiro ramo da curva numérica, o valor adotado para α teve de ser inferior aos restantes de forma a ajustar a curvatura.

5.3 DIC versus simulações numéricas

Nesta secção é efetuada a comparação, para dois casos pontuais, entre os resultados obtidos com a metodologia DIC e os resultados fornecidos através da análise numérica. Os provetes selecionados para tal comparação foram: (i) ADH1_L20_Lb200 e (ii) ADH2_L20_Lb100. Foram selecionados três instantes da análise efetuada com DIC para efetuar a análise comparativa, a saber: instantes 2, 3 e 4 (ver Secção 3.5.1). Assim, nas Figuras 5.8 e 5.9 são apresentadas, para os diferentes níveis de carga, as tensões de corte na interface laminado/adesivo, bem como o esforço axial instalado no laminado ao longo de L_b obtidos através das simulações analítico-numéricas. São também apresentadas as correspondentes imagens DIC.

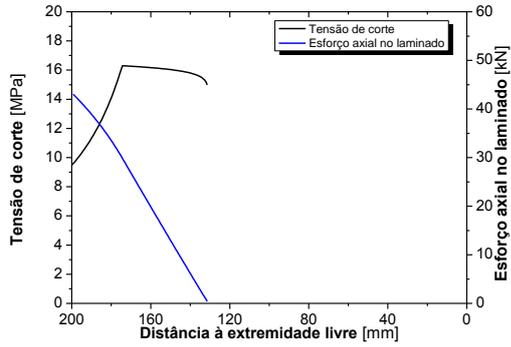
É notória a progressão da zona solicitada do comprimento de ancoragem em direção à extremidade livre nos dois casos. Na série ADH1_L20_Lb200 o modelo numérico apresenta

um atraso relativamente às imagens obtidas com DIC, enquanto na série ADH2_L20_Lb100, as duas estratégias adotadas parecem apresentar resultados semelhantes. De salientar que no primeiro caso, a zona referida onde se supõem encontrar-se as máximas tensões de corte nas imagens DIC (ver também Secção 3.5.1), assinalada com (*), parece estar de acordo (de forma aproximada) com a zona onde correm as máximas tensões de corte obtidas com as simulações numéricas. Este aspeto não é tão evidente no caso da série ADH2_L20_Lb100.

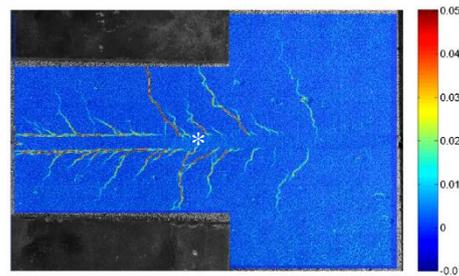
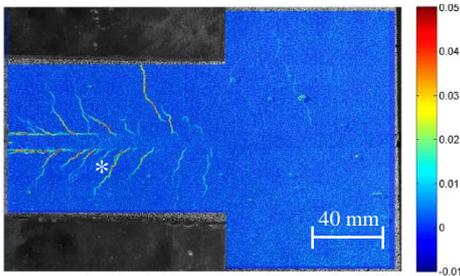
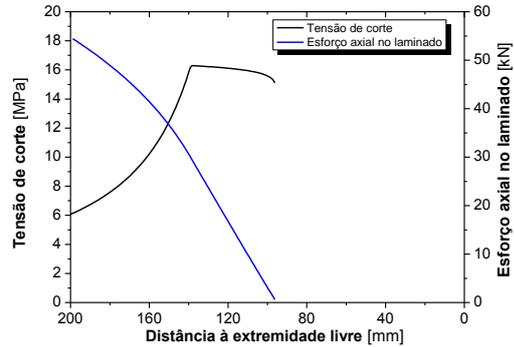
Desta análise efetuada ressalva-se o facto de não ser possível retirar conclusões efetivas, uma vez que os resultados dos ensaios realizados com DIC correspondem apenas a um provete, o que pode não ser representativo dos resultados médios, ao contrário dos dados apresentados para as simulações numéricas, baseados nos resultados experimentais médios. Este aspeto pode contribuir para justificar algum afastamento entre as duas análises.

ADH1_L20_Lb200

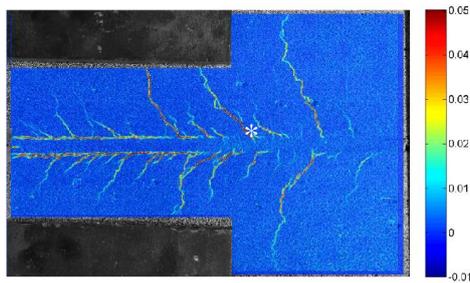
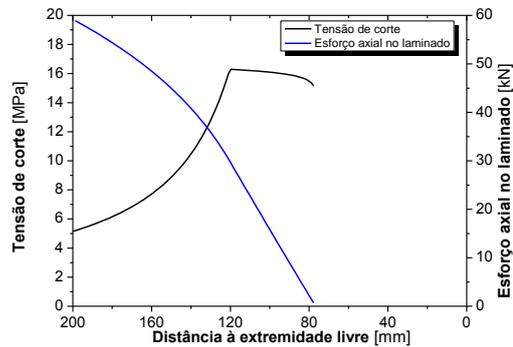
Instante 2



Instante 3



Instante 4 - F_{lmax}

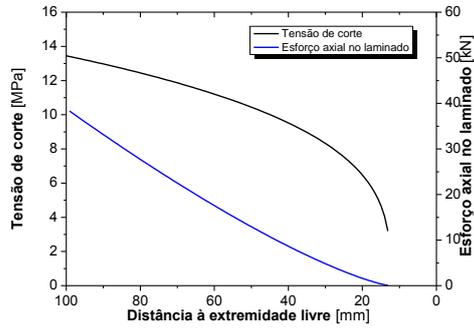


Notas: as extensões encontram-se em valor absoluto; o símbolo (*) localiza a zona onde provavelmente se encontra a tensão de corte máxima (local).

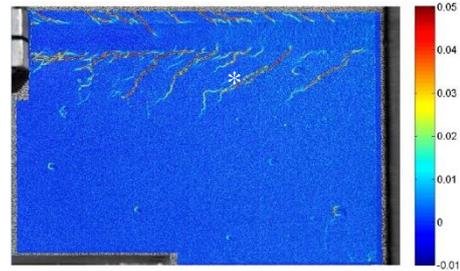
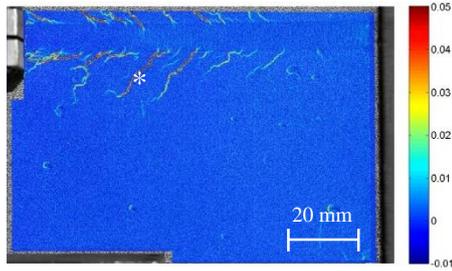
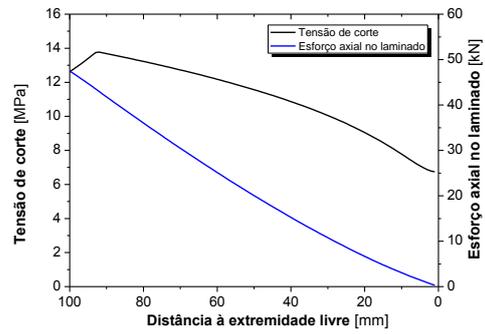
Figura 5.8 – DIC vs. simulações numéricas para a série ADH1_L20_Lb200.

ADH2_L20_Lb100

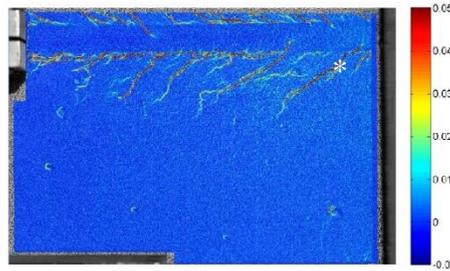
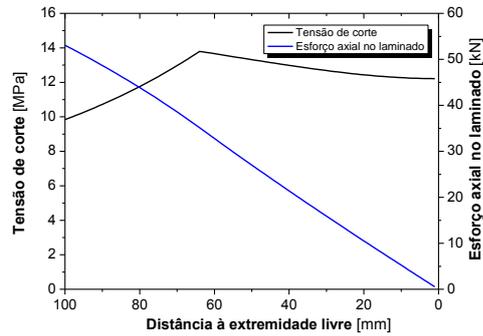
Instante 2



Instante 3



Instante 4 - F_{lmax}



Notas: as extensões encontram-se em valor absoluto; o símbolo (*) localiza a zona onde provavelmente se encontra a tensão de corte máxima (local).

Figura 5.9 – DIC vs. simulações numéricas para a série ADH2_L20_Lb100.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

6.1 Considerações finais

Em muitos dos países desenvolvidos, as construções existentes começam a apresentar problemas estruturais fruto, fundamentalmente, da ausência de manutenção. Uma das possíveis soluções para este tipo de problemas passa pela reabilitação estrutural. A técnica NSM, em virtude da sua eficácia, tem vindo a ser utilizada para o reforço à flexão de estruturas de betão armado. Para esta utilização muito tem contribuído a comunidade científica através dos mais distintos estudos realizados. Apesar deste significativo esforço, muitas áreas ainda não se encontram exploradas, como é o caso da influência do tipo de adesivo para o comportamento das estruturas reforçadas com esta técnica. Para compreender melhor este aspeto foi efetuado um estudo composto um programa experimental alargado e uma componente analítico-numérica. O estudo incluiu a análise a três tipos de adesivos, através de ensaios de arranque direto e ensaios de flexão em faixas de laje.

Nos ensaios de arranque direto, além da utilização dos três tipos de adesivos (ADH1, ADH2 e ADH3), foram também utilizados testados dois laminados de CFRP, diferindo na sua secção transversal (L10 e L20). Diferentes comprimentos de ancoragem foram também avaliados (Lb50, Lb60, Lb80, Lb100, Lb150, Lb200 e Lb300). A necessidade de testar os distintos comprimentos de ancoragem, conduziu à necessidade da utilização de dois tipos de geometria para os provetes de betão. Assim, para os comprimentos de ancoragem mais reduzidos (Lb50, Lb60, Lb80, Lb100) foram utilizados provetes cúbicos, enquanto para os restantes comprimentos foram utilizados provetes com geometria prismática. A instrumentação dos provetes inclui distintos sensores (transdutores de deslocamento e células de carga) e metodologias de instrumentação (sensorial e DIC). Em termos gerais, pode dizer-se que os adesivos ADH1 e ADH2 apresentam elevada eficiência na transferência de forças entre o reforço e o substrato, enquanto que no caso do adesivo ADH3, apesar da sua ductilidade, apresenta um nível de eficiência relativamente diminuto. Nos provetes ensaiados foram observados apenas dois modos de rotura: (i) o deslizamento na interface laminado de CFRP/adesivo e (ii) a rotura pelo laminado de CFRP. Com o uso dos adesivos ADH1 e ADH2, para os comprimentos de ancoragem mais reduzidos a rotura tende a dar-se por deslizamento na interface laminado de CFRP/adesivo; para comprimentos de ancoragem mais elevados a

rotura tende ocorrer no laminado de CFRP, independentemente do tipo de laminado. Pelo contrário, com o uso do adesivo ADH3, a rotura verifica-se sempre por deslizamento na interface laminado de CFRP/adesivo, não sendo possível para os comprimentos de ancoragem estudados alcançar a rotura do laminado. Para os adesivos ADH1 e ADH2 foi possível atingir uma tensão de corte média para a força de arranque máxima, no máximo, de cerca de 17 MPa, enquanto que no caso do adesivo ADH3 esta não foi além dos 2.4 MPa. Adicionalmente pode dizer-se que, tal como esperado, a força de arranque máxima aumenta com o aumento do comprimento de ancoragem. Laminados de secção transversal maior tendem a desenvolver maior capacidade de carga. Finalmente será de referir que a utilização da metodologia DIC permite perceber melhor o comportamento da ligação, sendo visíveis vários aspetos não perceptíveis pela observação durante o ensaio. A solicitação do betão e da ligação é completamente diferente dependendo do adesivo em estudo, sendo que para a fissuração observada é significativamente superior quando os adesivos ADH1 e ADH2 são usados.

Nos ensaios de flexão com faixas de lajes de betão armado, foram avaliados dois aspetos: (i) a influência do tipo de adesivo, bem como (ii) o efeito da pré-fendilhação no desempenho do elemento reforçado. A instrumentação destes ensaios em quatro pontos de carga incluiu transdutores de deslocamento, células de carga, extensómetros e microscópio manual. Dos ensaios efetuados concluiu-se que no caso em que a pré-fendilhação da laje não está presente, até ao momento do início da fissuração, o tipo de adesivo não parece ter grande influência; no entanto nas fases de plastificação das armaduras longitudinais de tração e carga máxima, o adesivo apresenta já uma importância significativa. Assim, observa-se que no caso em que os adesivos ADH1 e ADH2 foram usados, as faixas de laje apresentam superior performance traduzida por uma carga de início da plastificação das armaduras e última cerca de, respetivamente, 21% e 24% superiores, às obtidas quando o adesivo ADH3 é usado. Apesar disto, as lajes em que o adesivo ADH3 foi usado apresentaram superior ductilidade e um modo de rotura mais dúctil, em resultado de um modo de rotura que ocorreu pelo progressivo destacamento do laminado em relação ao adesivo; no caso das lajes em que os adesivos ADH1 e ADH2 foram usados, a rotura deu-se pelo esgotamento da capacidade dos laminados de CFRP. O desempenho em termos de capacidade de carga proporcionada com a utilização do adesivo 3 foi muito mais próximo do observado com os adesivos 1 e 2 nos ensaios de flexão comparativamente com os ensaios de arranque direto. Esta diferença pode ser fruto quer do maior comprimento da ligação entre o laminado de CFRP e o betão no caso das faixas de laje,

quer das diferenças em termos de solicitação do sistema NSM-CFRP observadas nos dois tipos de ensaios.

Um método analítico-numérico anteriormente desenvolvido e utilizado noutros trabalhos, foi usado para determinar a lei local de tensão de corte *versus* deslizamento ($\tau - s$) para os provetes dos ensaios de arranque direto do presente estudo. A forma de obtenção de tal lei baseia-se numa estratégia de análise inversa por comparação dos resultados numéricos com os resultados experimentais. Em geral, os tipos de lei $\tau - s$ utilizadas permitiram simular os resultados experimentais força de arranque *versus* deslizamento com rigor suficiente, em especial, para comprimentos de ancoragem mais baixos. Observou-se que as leis locais obtidas numericamente são dependentes do comprimento de ancoragem, o que em termos reais poderá não ser completamente verdade já que é um fenómeno local. Este aspeto está relacionado com algumas limitações que o modelo apresenta.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Realizando uma retrospectiva do trabalho realizado, pode concluir-se que os objetivos pré-estabelecidos foram alcançados. Os estudos experimentais contribuíram para o alargamento do conhecimento sobre a influência da utilização de diferentes tipos de adesivos no reforço com a técnica NSM. As simulações numéricas permitiram inferir sobre a lei local de tensão de corte-deslizamento utilizando diferentes adesivos. No entanto, tendo em conta que o desempenho com a utilização de um dos adesivos ficou aquém do esperado, o trabalho de investigação deve continuar neste campo.

Uma nova configuração de ensaio para maiores comprimentos de ancoragem deve ser adotada de forma a minimizar os problemas associados à configuração com provetes prismáticos utilizada.

Os fornecedores dos materiais de reforço utilizados sugerem a utilização de adesivos e laminados de um mesmo fabricante, o que não foi o caso da presente investigação. Por isso, sugere-se que de futuro esse trabalho seja realizado.

O número de provetes em que se procedeu ao estudo com a metodologia DIC foi algo limitado, pelo que é necessário efetuar um maior número de ensaios de forma a se obterem resultados mais concisos relativamente ao comportamento da ligação de sistemas NSM-CFRP nas condições estudadas.

Outra sugestão passa por estudar o comportamento da ligação com a utilização de adesivos com baixo módulo de elasticidade para comprimentos de aderência maiores, a fim de se avaliar se com o aumento do comprimento de ancoragem o desempenho da ligação melhora.

Sugere-se também o estudo do comportamento à flexão com um sistema misto de adesivos, i.e., adesivos de baixo módulo de elasticidade e adesivos rígidos como até aqui tem sido utilizados. Por um lado, os primeiros permitirão ter uma rotura mais dúctil, ao mesmo tempo que os segundos assegurarão uma maior capacidade de carga. Por outro lado, pode também ser utilizado apenas um adesivo com propriedades intermédias entre as dos adesivos ADH1 e ADH2 e do adesivo ADH3.

Quanto às simulações numéricas realizadas, verifica-se que os resultados obtidos para a lei $\tau - s$ são dependentes do comprimento de ancoragem. Sugere-se a implementação de um método que não apresente esta particularidade, uma vez que se trata de uma lei local, esta não deve ser dependente do comprimento de ancoragem.

Finalmente, considera-se de vital importância a simulação dos ensaios com as faixas de laje recorrendo ao método dos elementos finitos. Estas não foram simuladas no âmbito do presente trabalho por limitações de tempo. Assim, com a realização destas simulações será possível melhor interpretar os resultados obtidos, bem como, p.e. prever numericamente o resultado da utilização de um sistema híbrido com recurso a distintos adesivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barros, J., Sena-Cruz, J., Dias, S. & Ferreira, D. R. S. M. (2007). Nova Abordagem no Reforço de Estruturas com Materiais Compósitos. *Ingenium*, 84-90.
- Barros, J. A. O. & Dias, S. J. E. (2006). Near surface mounted CFRP laminates for shear strengthening of concrete beams. *Cement and Concrete Composites*, 28, 276-292.
- CEB-FIP (1993). CEB-FIP Model Code 1990 - Design Code. Lausanne, Switzerland: Thomas Telford.
- Chu, T. C., Ranson, W. F. & Sutton, M. A. (1985). Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. *Experimental Mechanics*, 25, 232-244.
- Coelho, M. R. F., Sena-Cruz, J. M. & Neves, L. A. C. (2015). A review on the bond behavior of FRP NSM systems in concrete. *Construction and Building Materials*, 93, 1157-1169.
- Cruz, J. S. & Barros, J. (2004). Modeling of bond between near-surface mounted CFRP laminate strips and concrete. *Computers & Structures*, 82, 1513-1521.
- De Lorenzis, L. (2002). *Strengthening of RC structures with near-surface mounted FRP rods*. PhD Tesis, University of Lecce.
- De Lorenzis, L., Rizzo, A. & La Tegola, A. (2002). A modified pull-out test for bond of near-surface mounted FRP rods in concrete. *Composites Part B: Engineering*, 33, 589-603.
- De Lorenzis, L. & Teng, J. G. (2007). Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures. *Composites Part B: Engineering*, 38, 119-143.
- Dias, S. J. E., Juvandes, L. F. P. & Figueiras, J. A. (2004). Efeito da pré-fendilhação do betão no comportamento à flexão de faixas de laje reforçadas com sistemas compósitos de CFRP. *REC*, Número 19, 41-54.
- Fernandes, P. M. G., Silva, P., Sena-Cruz, J., Xavier, J., Coelho, M. R. F. & Barros, J. A. O. (2012). Diferentes métodos de avaliação do comportamento da ligação de laminados de CFRP ao betão de acordo com a técnica NSM. *Encontro Nacional BETÃO ESTRUTURAL - BE2012*. FEUP, Porto.
- Fernandes, P. M. G., Silva, P. M. & Sena-Cruz, J. (2015). Bond and flexural behavior of concrete elements strengthened with NSM CFRP laminate strips under fatigue loading. *Engineering Structures*, 84, 350-361.
- FIEC (2014). Key Figures Activity 2013. Construction in Europe. 2014 ed.: European Construction Industry Federation.
- Garzón-Roca, J., Sena-Cruz, J. M., Fernandes, P. & Xavier, J. (2015). Effect of wet-dry cycles on the bond behaviour of concrete elements strengthened with NSM CFRP laminate strips. *Composite Structures*, 132, 331-340.

- IPQ (2011). Ensaios de betão endurecido – Parte 3: Resistência à compressão dos provetes. *Norma Portuguesa NP EN 12390-3*. Caparica: Instituto Português da Qualidade.
- Khshain, N. T., Al-Mahaidi, R. & Abdouka, K. (2015). Bond behaviour between NSM CFRP strips and concrete substrate using single-lap shear testing with epoxy adhesive. *Composite Structures*, 132, 205-214.
- Kwiecień, A. (2012). Stiff and flexible adhesives bonding CFRP to masonry substrates - Investigated in pull-off test and Single-Lap test. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 12, 228-239.
- LNEC (1993). Betão - Determinação do módulo de elasticidade em compressão. *E397-1993*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Macedo, L., Costa, I. & Barros, J. (2008). Avaliação da influência das propriedades de adesivos e da geometria de laminados de fibra de carbono no comportamento de ensaios de arranque. *BE2008 – Encontro Nacional Betão Estrutural 2008*. Guimarães.
- Mostakhdemin Hosseini, M. R., Dias, S. J. E. & Barros, J. A. O. (2014). Effectiveness of prestressed NSM CFRP laminates for the flexural strengthening of RC slabs. *Composite Structures*, 111, 249-258.
- Oehlers, D. J., Rashid, R. & Seracino, R. (2008). IC debonding resistance of groups of FRP NSM strips in reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 22, 1574-1582.
- Peng, H., Hao, H., Zhang, J., Liu, Y. & Cai, C. S. (2015). Experimental investigation of the bond behavior of the interface between near-surface-mounted CFRP strips and concrete. *Construction and Building Materials*, 96, 11-19.
- Pereira, E. B., Fischer, G. & Barros, J. A. O. (2012). Direct assessment of tensile stress-crack opening behavior of Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC). *Cement and Concrete Research*, 42, 834-846.
- Sena-Cruz, J., Barros, J., Bianco, V., Bilotta, A., Bournas, D., Ceroni, F., Dalfré, G., Kotynia, R., Monti, G., Nigro, E. & Triantafillou, T. (2015a). Prestressed FRP Systems. Design Procedures for the Use of Composites in Strengthening of Reinforced Concrete. *RILEM State-of-the-Art Reports 19*. C. Pellegrino and J. Sena-Cruz (eds.), 303-348.
- Sena-Cruz, J., Cunha, V. M. C. F., Camões, A., Barros, J. A. O. & Cruz, P. (2009). Modelling of bond between galvanized steel rebars and concrete. In: © SEMNI, E. (ed.) *Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería 2009*. Barcelona, 29 junio al 2 de julio 2009.
- Sena-Cruz, J., Fernandes, P., Silva, P., Benedetti, A., Granja, J. & Azenha, M. (2015b). Bond Durability and Quality Control of NSM-Concrete Systems. *COST Action TU1207, Next Generation Design Guidelines for Composites in Construction*. Lecce, Italy.
- Sena-Cruz, J., Jorge, M., Branco, J. M. & Cunha, V. M. C. F. (2013). Bond between glulam and NSM CFRP laminates. *Construction and Building Materials*, 40, 260-269.

- Sena-Cruz, J. M. (2005). *Strengthening of concrete structures with near-surface mounted CFRP laminate strips*. PhD Tesis, University of Minho.
- Sena-Cruz, J. M., Barros, J. A. O., Coelho, M. R. F. & Silva, L. F. F. T. (2012). Efficiency of different techniques in flexural strengthening of RC beams under monotonic and fatigue loading. *Construction and Building Materials*, 29, 175-182.
- Sena Cruz, J. M., Barros, J. A. O., Gettu, R. & Azevedo, Á. F. M. (2006). Bond behavior of near-surface mounted CFRP laminate strips under monotonic and cyclic loading. *Journal of Composites for Construction*, 10, 295-303.

ANEXO I – Resultados dos ensaios de arranque direto

Tabela I.1 – Resultados totais dos ensaios de arranque direto.

Adesivo	Secção transversal do laminado [mm ²]	Provete	F_{lmax}	F_{lmax}/F_{fu}	$\tau_{max,av1}$	$\tau_{max,av2}$	S_{fmax}	S_{lmax}	MR
			[kN]	[%]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[mm]	-
Adesivo 1	10×1.4	ADH1_L10_Lb60_1	22.11	59.76	16.16	10.17	-	0.45	D
		ADH1_L10_Lb60_2	22.72	61.41	16.61	10.45	-	0.58	D
		ADH1_L10_Lb60_3	22.63	61.16	16.54	10.40	-	0.48	D
		Média	22.49	60.77	16.44	10.34	-	0.50	-
		Desvio padrão	0.33	0.89	0.24	0.15	-	0.07	-
		CoV [%]	1.46	1.46	1.46	1.46	-	13.80	-
		ADH1_L10_Lb80_1	26.5	71.62	14.53	9.14	-	0.68	D
		ADH1_L10_Lb80_2	26.01	70.30	14.26	8.97	-	0.70	D
		ADH1_L10_Lb80_3	25.41	68.68	13.93	8.76	-	0.66	D
		Média	25.97	70.20	14.24	8.96	-	0.68	-
		Desvio padrão	0.55	1.48	0.30	0.19	-	0.02	-
		CoV [%]	2.10	2.10	2.10	2.10	-	3.28	-
		ADH1_L10_Lb100_1	29.11	78.68	12.77	8.03	-	0.87	D
		ADH1_L10_Lb100_2	30.73	83.05	13.48	8.48	-	0.93	D
	ADH1_L10_Lb100_3	28.87	78.03	12.66	7.96	-	1.00	D	
	Média	29.57	79.92	12.97	8.16	-	0.93	-	
	Desvio padrão	1.01	2.73	0.44	0.28	-	0.07	-	
	CoV [%]	3.42	3.42	3.42	3.42	-	7.06	-	
	20×1.4	ADH1_L20_Lb80_1	48.16	60.20	14.07	10.73	-	0.52	D
		ADH1_L20_Lb80_2 ⁽¹⁾	41.14	51.43	12.02	9.17	-	0.27	D
		ADH1_L20_Lb80_3	45.21	56.51	13.20	10.08	-	0.47	D
		Média	46.69	58.36	13.63	10.41	-	0.50	-
		Desvio padrão	2.09	2.61	0.61	0.46	-	0.04	-
		CoV [%]	4.47	4.47	4.47	4.47	-	7.03	-
		ADH1_L20_Lb100_1	48.01	60.01	11.22	8.56	-	0.60	D
		ADH1_L20_Lb100_2	51.23	64.04	11.97	9.14	-	0.69	D
ADH1_L20_Lb100_3		47.49	59.36	11.10	8.47	-	0.64	D	
Média		48.91	61.14	11.43	8.72	-	0.64	-	
Desvio padrão		2.03	2.53	0.47	0.36	-	0.05	-	
CoV [%]		4.14	4.14	4.14	4.14	-	7.11	-	

Notas: MR – Modos de rotura: D = Rotura por deslizamento do laminado de CFRP na interface laminado/adesivo
F = Rotura do laminado de CFRP; os valores entre parênteses representam os coeficientes de variação (CoV).

⁽¹⁾ Resultado não considerado para a média.

Tabela I.1 (cont.) – Resultados totais dos ensaios de arranque direto.

Adesivo	Secção transversal do laminado [mm ²]	Provete	F_{lmax}	F_{lmax}/F_{fu}	$\tau_{max,av1}$	$\tau_{max,av2}$	S_{fmax}	S_{lmax}	MR
			[kN]	[%]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[mm]	-
Adesivo 1	20×1.4	ADH1_L20_Lb200_1	58.28	72.85	6.81	5.19	0.067	1.28	D
		ADH1_L20_Lb200_2	60.77	75.96	7.10	5.42	0.042	0.92	F
		ADH1_L20_Lb200_3 ⁽¹⁾	57.73	72.16	6.74	5.14	0.072	1.10	-
		Média	59.53	74.41	6.95	5.30	0.05	1.10	-
		Desvio padrão	1.76	2.20	0.21	0.16	0.02	0.25	-
		CoV [%]	3.0	3.0	3.0	3.0	32.2	22.7	-
		ADH1_L20_Lb300_1 ⁽¹⁾	56.3	70.38	4.38	3.34	0.01	0.74	F
		ADH1_L20_Lb300_2	62.16	77.70	4.84	3.69	0.01	1.12	F
		ADH1_L20_Lb300_3	59.89	74.86	4.66	3.56	0.01	1.43	F
		Média	61.03	76.28	4.75	3.63	0.01	1.27	-
		Desvio padrão	1.61	2.01	0.13	0.10	0.00	0.22	-
		CoV [%]	2.63	2.63	2.63	2.63	38.07	17.19	-
Adesivo 2	20×1.4	ADH2_L20_Lb80_1	45.88	57.35	13.40	10.23	-	0.58	D
		ADH2_L20_Lb80_2	50.04	62.55	14.61	11.15	-	0.32	D
		ADH2_L20_Lb80_3	49.27	61.59	14.39	10.98	-	0.55	D
		Média	48.40	60.50	14.13	10.79	-	0.48	-
		Desvio padrão	2.21	2.77	0.65	0.49	-	0.14	-
		CoV [%]	4.57	4.57	4.57	4.57	-	28.97	-
		ADH2_L20_Lb100_1	52.3	65.38	12.22	9.33	-	0.76	D
		ADH2_L20_Lb100_2	53.14	66.43	12.42	9.48	-	0.66	D
		ADH2_L20_Lb100_3	56.73	70.91	13.25	10.12	-	0.83	D
		Média	54.06	67.57	12.63	9.64	-	0.75	-
		Desvio padrão	2.35	2.94	0.55	0.42	-	0.09	-
		CoV [%]	4.35	4.35	4.35	4.35	-	11.91	-
		ADH2_L20_Lb200_1 ⁽¹⁾	57.98	72.48	6.77	5.17	0.0155	0.88	-
		ADH2_L20_Lb200_2	52.68	65.85	6.15	4.69	0.0407	0.94	D
		ADH2_L20_Lb200_3	57.69	72.11	6.74	5.14	0.0007	0.81	F
		Média	55.19	68.98	6.45	4.92	0.02	0.88	-
		Desvio padrão	3.54	4.43	0.41	0.32	0.03	0.09	-
		CoV [%]	6.42	6.42	6.42	6.42	136.64	9.99	-
		ADH2_L20_Lb300_1	58.86	73.58	4.58	3.50	0.0368	2.26	F + D
		ADH2_L20_Lb300_2	59.24	74.05	4.61	3.52	0.0256	2.16	F + D
ADH2_L20_Lb300_3	62.97	78.71	4.90	3.74	0.0005	1.60	F		
Média	60.36	75.45	4.70	3.59	0.02	2.01	-		
Desvio padrão	2.27	2.84	0.18	0.13	0.02	0.35	-		
CoV [%]	3.76	3.76	3.76	3.76	88.66	17.66	-		

Notas: MR – Modos de rotura: D = Rotura por deslizamento do laminado de CFRP na interface laminado/adeseivo
F = Rotura do laminado de CFRP; os valores entre parênteses representam os coeficientes de variação (CoV).

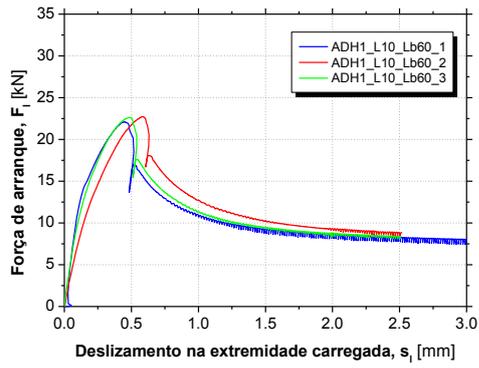
⁽¹⁾ Resultado não considerado para a média

Tabela I.1 (cont.) – Resultados totais dos ensaios de arranque direto.

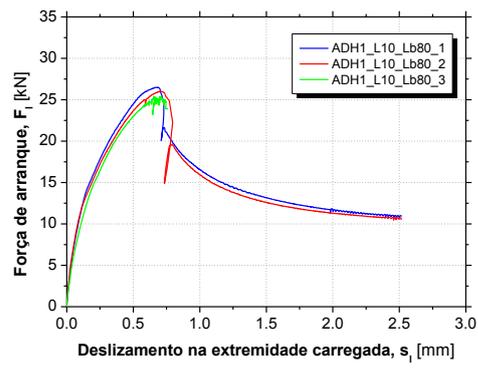
Adesivo	Secção transversal do laminado [mm ²]	Provete	$F_{lm\acute{a}x}$	$F_{lm\acute{a}x}/F_{fu}$	$\tau_{max,av1}$	$\tau_{max,av2}$	S_{fmax}	S_{lmax}	MR
			[kN]	[%]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[mm]	-
Adesivo 3	10×1.4	ADH3_L10_Lb50_1	2.34	6.32	2.05	1.29	-	1.18	D
		ADH3_L10_Lb50_2	2.49	6.73	2.18	1.37	-	1.21	D
		ADH3_L10_Lb50_3	2.21	5.97	1.94	1.22	-	0.98	D
		Média	2.35	6.34	2.06	1.29	-	1.12	-
		Desvio padrão	0.14	0.38	0.12	0.08	-	0.13	-
		CoV [%]	5.97	5.97	5.97	5.97	-	11.18	-
		ADH3_L10_Lb100_1	5	13.51	2.19	1.38	-	1.26	D
		ADH3_L10_Lb100_2	5.39	14.57	2.36	1.49	-	1.55	D
		ADH3_L10_Lb100_3	4.7	12.70	2.06	1.30	-	1.18	D
		Média	5.03	13.59	2.21	1.39	-	1.33	-
		Desvio padrão	0.35	0.94	0.15	0.10	-	0.20	-
		CoV [%]	6.88	6.88	6.88	6.88	-	14.68	-
		ADH3_L10_Lb150_1	7.60	20.54	2.22	1.40	-	1.66	D
		ADH3_L10_Lb150_2	8.62	23.30	2.52	1.59	-	1.76	D
		ADH3_L10_Lb150_3	8.15	22.03	2.38	1.50	-	1.71	D
	Média	8.12	21.95	2.38	1.49	-	1.71	-	
	Desvio padrão	0.51	1.38	0.15	0.09	-	0.05	-	
	CoV [%]	6.28	6.28	6.28	6.28	-	2.87	-	
	20×1.4	ADH3_L20_Lb80_1	4.98	6.23	1.45	1.11	-	1.81	D
		ADH3_L20_Lb80_2	5.85	7.31	1.71	1.30	-	1.80	D
		ADH3_L20_Lb80_3	6.31	7.89	1.84	1.41	-	2.04	D
		Média	5.71	7.14	1.67	1.27	-	1.88	-
		Desvio padrão	0.68	0.84	0.20	0.15	-	0.14	-
		CoV [%]	11.82	11.82	11.82	11.82	-	7.36	-
		ADH3_L20_Lb100_1	9.92	12.40	2.32	1.77	-	2.17	D
		ADH3_L20_Lb100_2 ⁽²⁾	-	-	-	-	-	-	-
		ADH3_L20_Lb100_3	9.85	12.31	2.30	1.76	-	2.05	D
Média		9.89	12.36	2.31	1.76	-	2.11	-	
Desvio padrão		0.05	0.06	0.01	0.01	-	0.08	-	
CoV [%]		0.50	0.50	0.50	0.50	-	4.03	-	

Notas: MR – Modos de rotura: D = Rotura por deslizamento do laminado de CFRP na interface laminado/adesivo associada à remoção de uma fina camada de adesivo presente na superfície do laminado de CFRP; os valores entre parênteses representam os coeficientes de variação (CoV).

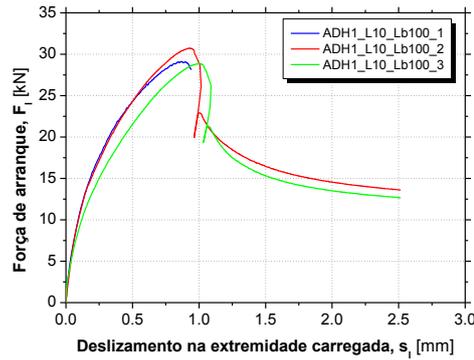
⁽²⁾ Ensaio não realizado devido a problemas com o provete.



(a)

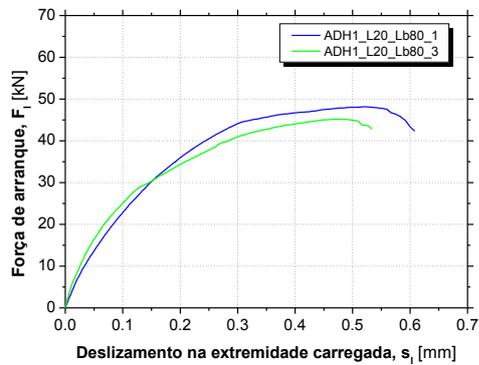


(b)

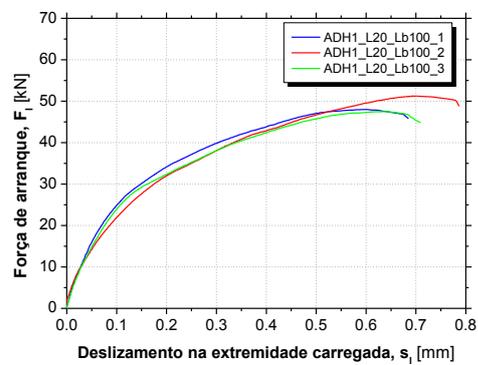


(c)

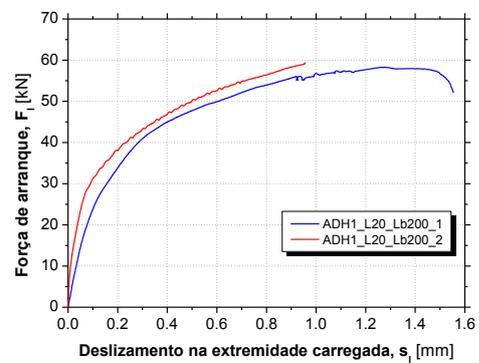
Figura I.1 – Força de arranque vs. deslocamento na extremidade carregada da série ADH1_L10: (a) Lb60; (b) Lb80; (c) Lb100.



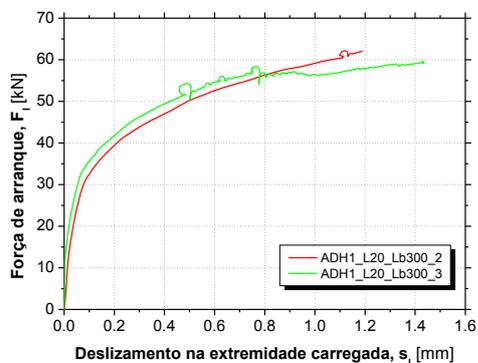
(a)



(b)

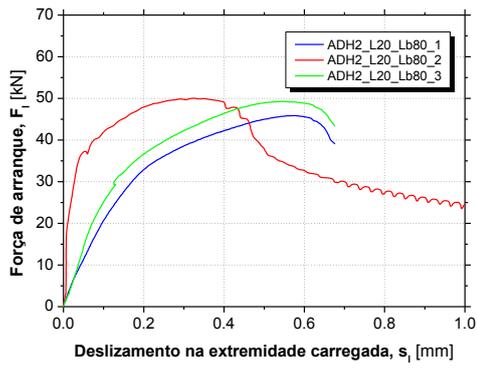


(c)

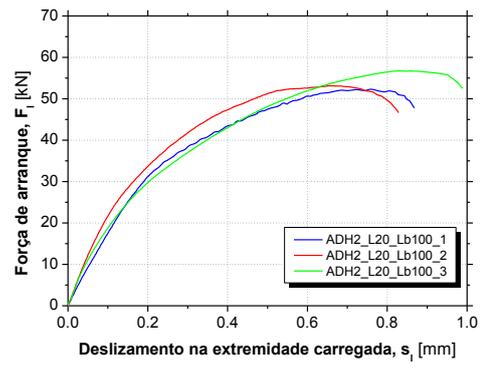


(d)

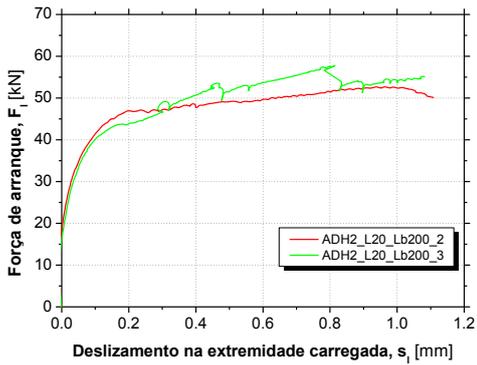
Figura I.2 – Força de arranque vs. deslocamento na extremidade carregada da série ADH1_L20: (a) Lb80; (b) Lb100; (c) Lb200; (d) Lb300.



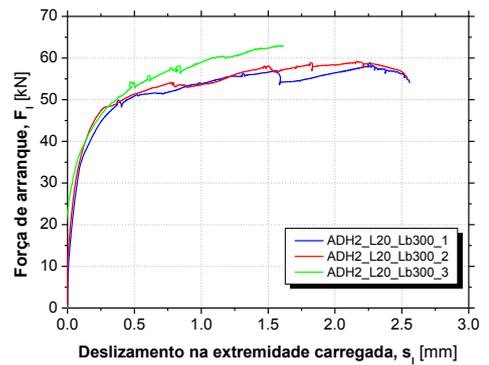
(a)



(b)

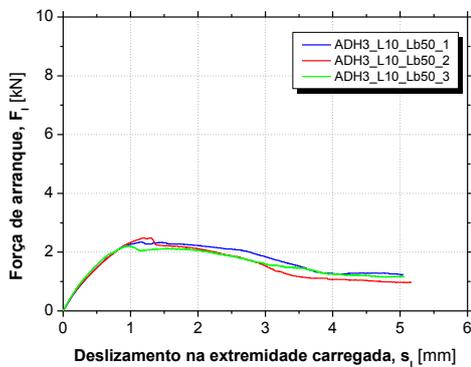


(c)

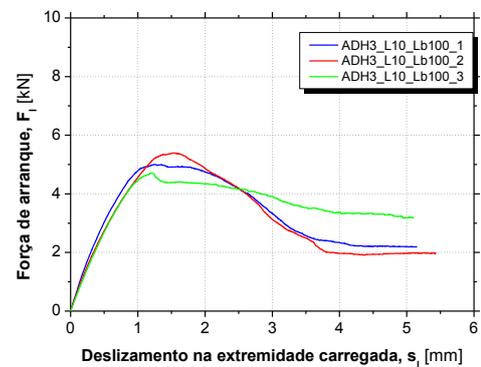


(d)

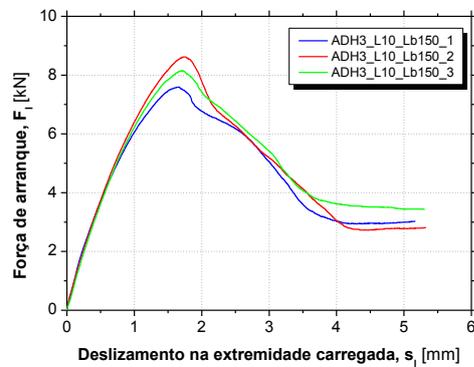
Figura I.3 – Força de arranque vs. deslocamento na extremidade carregada da série ADH2_L20: (a) Lb80; (b) Lb100; (c) Lb200; (d) Lb300.



(a)

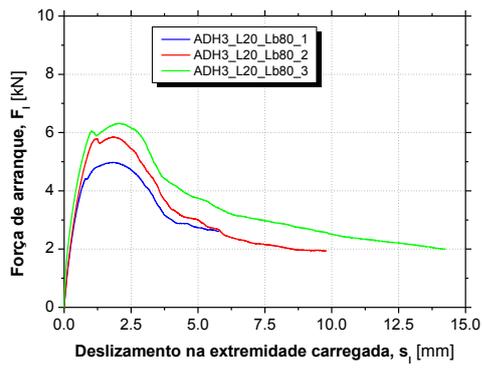


(b)

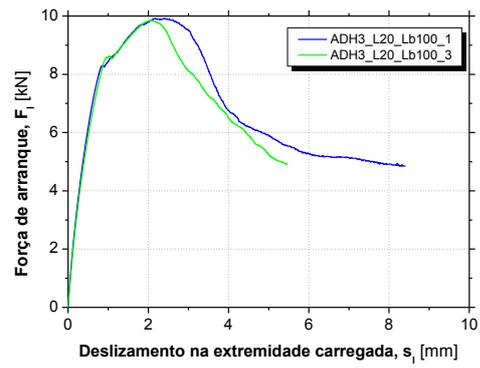


(c)

Figura I.4 – Força de arranque vs. deslocamento na extremidade carregada da série ADH3_L10: (a) Lb50; (b) Lb100; (c) Lb150.



(a)



(b)

Figura I.5 – Força de arranque vs. deslocamento na extremidade carregada da série ADH3_L20: (a) Lb80; (b) Lb100.