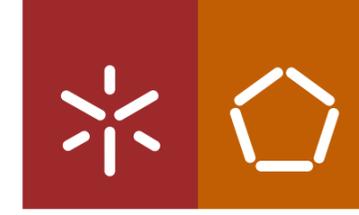


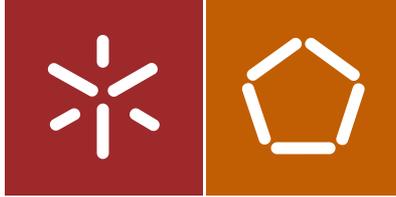


João Nuno Ferros Boaventura

Elementos de betão reforçados com laminados
de CFRP: aderência e comportamento à flexão

Universidade do Minho
Escola de Engenharia





Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Nuno Ferros Boaventura

Elementos de betão reforçados com laminados
de CFRP: aderência e comportamento à flexão

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

Trabalho efectuado sob a orientação de
Professor Doutor José Manuel de Sena Cruz
Doutor Mário Rui Freitas Coelho

DECLARAÇÃO

Nome: João Nuno Ferros Boaventura

Endereço eletrónico: jnfboaventura@gmail.com Telefone: 933360047

Bilhete de Identidade/Cartão do Cidadão: 13361110

Título da dissertação: Elementos de betão reforçados com laminados de CFRP: aderência e comportamento à flexão

Orientadores:

Professor Doutor José Manuel da Sena Cruz

Doutor Mário Rui Freitas Coelho

Ano de conclusão: 2018

Mestrado em Engenharia Civil

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, ____/____/_____

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

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

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

Ao aluno de doutoramento Ricardo Cruz, ao Doutor Luís Correia e ao Doutor Pedro Fernandes manifesto o meu profundo agradecimento por todo o apoio, pelos conselhos, disponibilidade, ensinamentos e sobretudo pela amizade.

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

Aos meus amigos de sempre e aos que estes cinco anos me trouxeram, pelo apoio, compreensão, amizade e companheirismo demonstrado ao longo de todo este percurso. Em especial aos que para além de amigos foram sempre companheiros de trabalho: Agostinho Matos, Pedro Leite, Diogo Coelho e Bruno Vilela.

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

Este trabalho foi apoiado por fundos nacionais através da FCT e cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do Programa Operacional Fatores de Competitividade e internacionalização (POCI) e do Programa Regional de Lisboa no âmbito dos projetos FRPLongDur POCI-01-0145-FEDER-016900 (PTDC/ECM-EST/1282/2014) e POCI-01-0145-FEDER-007633.

Agradeço também a contribuição das seguintes empresas: S&P – Clever Reinforcement (oferta dos laminados CFK e adesivo S&P Resin 220), Tecnipor (produção de provetes), Unibetão (produção de provetes) e Artecanter (transporte e tratamento de superfície dos provetes).

RESUMO

Têm vindo a ser cada mais utilizados materiais compósitos no reforço de estruturas existentes de betão armado. Dentro dos materiais compósitos destacam-se os CFRP (*carbon fiber-reinforced polymer*) que são normalmente aplicados segundo duas técnicas principais, a técnica NSM (*near-surface mounted*) que consiste na inserção dos CFRP no interior da secção de betão armado a reforçar, e a técnica EBR (*externally bonded reinforcement*) que se destaca pelo facto dos CFRP serem colados externamente na secção de betão armado a reforçar.

A presente dissertação está inserida no projeto de investigação *FRPLongDur* (FCT - PTDC/ECM-EST/1282/2014), que pretende estudar a durabilidade e comportamento a longo prazo de estruturas de betão armado reforçadas com CFRP. O trabalho desenvolvido consistiu na execução das séries de provetes que vão ser estudadas ao longo do decorrer do projeto, na caracterização da série de provetes usada como referência e na simulação dos resultados obtidos experimentalmente recorrendo às normas em vigor. O projeto *FRPLongDur* consiste, resumidamente, na execução de sete séries de provetes, sendo uma das séries ensaiada (de referência), objeto desta dissertação, e sendo as restantes posteriormente colocadas em seis ambientes de exposição diferentes durante um período estimado de 10 anos, ao longo dos quais as séries serão monitorizadas.

Os ensaios de aderência e à flexão realizados no âmbito do presente trabalho mostram, respetivamente, que a técnica NSM apresenta um melhor comportamento mecânico, quando comparada com a técnica EBR e, que as técnicas utilizadas no reforço das faixas de laje, nomeadamente as técnicas NSM, EBR, EBR-MA (*externally bonded reinforcement – mechanical anchorage*) e EBR-GA (*externally bonded reinforcement – gradient anchorage*), mostraram uma melhoria do comportamento à flexão destas quando comparadas com uma faixa de laje sem reforço. Destas técnicas as que mostraram melhor comportamento à flexão foram as técnicas NSM e EBR-MA. As simulações analíticas realizadas revelaram que nem todas as normas utilizadas conseguem reproduzir com rigor suficiente os valores obtidos experimentalmente.

Palavras-Chave: EBR, NSM, EBR-MA, EBR-GA, laminados de CFRP, aderência, reforço à flexão, simulações analíticas.

ABSTRACT

There have been increasingly more composite materials used in the reinforcement of existing reinforced concrete structures. Among the composites, CFRP (carbon fiber-reinforced polymer) is usually applied according to two main techniques, the NSM (near-surface mounted) technique, which consists of the insertion of the CFRP inside the reinforced concrete section to be reinforced, and the EBR (externally bonded reinforcement) technique, which stands out because the CFRP are bonded externally in reinforced concrete section to be reinforced.

The present dissertation is part of the *FRPLongDur* research project (FCT - PTDC/ECM-EST/1282/2014), which intends to study the durability and the long term behaviour of reinforced concrete structures reinforced with CFRP. The work developed consisted in the execution of the series of test specimens that will be studied throughout the course of the project, in the characterization of a reference test specimens series and in the simulation of the results obtained experimentally using the existing standards. The *FRPLongDur* project consists, in short, of seven sets of test specimens, one of the series being tested (reference series), object of this dissertation, and the rest being later stored in six different environments during an estimated period of 10 years, along which the series will be monitored.

The adhesion and flexural tests performed show, respectively, that the NSM technique presents a superior bonding behavior when compared to the EBR technique and that the techniques used to reinforce the slab strips, namely NSM, EBR, EBR-MA (externally bonded reinforcement – mechanical anchorage) and EBR-GA (externally bonded reinforcement – gradient anchorage) showed an improvement in their flexural behavior when compared to a non-reinforced slab strip. Of these techniques, the ones that showed the best flexural behavior were the NSM and EBR-MA techniques. The analytical simulations carried out revealed that not all norms used in them can accurately reproduce the values obtained experimentally.

KEYWORDS: EBR, NSM, EBR-MA, EBR-GA, CFRP laminates, bond, flexural strengthening, analytical simulations.

ÍNDICE

Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas	xv
1. Introdução.....	1
1.1 Reforço de estruturas de betão armado	2
1.2 Materiais compósitos no reforço à flexão de estruturas de betão armado.....	3
1.3 Técnicas de reforço à flexão de estruturas de betão armado com recurso a laminados de <i>Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP)</i>	6
1.3.1 <i>Externally Bonded Reinforcement (EBR)</i>	7
1.3.2 <i>Near-Surface Mounted (NSM)</i>	8
1.3.3 <i>Externally Bonded Reinforcement – Mechanical Anchorage (EBR-MA)</i>	8
1.3.4 <i>Externally Bonded Reinforcement – Gradient Anchorage (EBR-GA)</i>	8
1.4 Objetivos da dissertação.....	9
1.5 Estrutura da dissertação.....	10
2. Projeto <i>FRPLongDur</i>	11
2.1 Motivação	11
2.2 Objetivos.....	11
2.3 Metodologia	13
2.4 Contributo da presente dissertação no âmbito do <i>FRPLongDur</i>	17
3. Investigação Experimental.....	19
3.1 Programa Experimental	19
3.2 Preparação dos provetes	19
3.2.1 Ensaios de arranque direto	23
3.2.2 Ensaios de flexão.....	28
3.3 Caracterização dos materiais.....	40
3.3.1 Betão	40
3.3.2 Armadura	41

3.3.3	Laminados de CFRP	42
3.3.4	Adesivo Epóxi	43
4.	Resultados e Análise	47
4.1	Ensaio de arranque direto	47
4.2	Ensaio de flexão	53
5.	Simulações analíticas.....	61
5.1	Ensaio de arranque direto.....	61
5.1.1	Técnica NSM	61
5.1.2	Técnica EBR.....	63
5.2	Ensaio de flexão	64
5.2.1	Técnicas EBR, EBR-GA e EBR-MA.....	64
5.2.2	Técnica NSM	70
6.	Conclusões.....	71
6.1	Programa experimental	71
6.2	Ensaio de aderência	72
6.3	Ensaio de flexão	73
6.4	Simulações analíticas	74
6.5	Futuros desenvolvimentos	75
	Bibliografia	77

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Fluxograma do projeto FRPLongDur.	12
Fig. 2.2 – Série de provetes (MT + BT + ST): (a) vista 3D; (b) planta.....	14
Fig. 2.3 - Localização dos ambientes reais. E1 – Referência (Guimarães); E2 – Humidade (Guimarães); E3 – Carbonatação (Lisboa); E4 – Cloretos (Porto); E5 – Gelo/degelo (Guarda); E6 – Temperaturas elevadas (Elvas).....	16
Fig. 3.1 – Perspetiva geral das cofragens utilizadas.....	20
Fig. 3.2 – Cofragens: (a) cofragem para as faixas de laje; (b) cofragem para os provetes cúbicos; (c) cofragem para os provetes paralelepípedicos.	20
Fig. 3.3 – Instrumentação nas faixas de laje.	21
Fig. 3.4 – Betonagem.....	21
Fig. 3.5 – Caracterização do betão utilizado: (a) e (b) ensaio de slump; (c) vibração do betão dos cilindros.	22
Fig. 3.6 – Tratamento de superfície (jato de areia).	22
Fig. 3.7 – Configuração do pórtico para o ensaio dos provetes reforçados com a técnica NSM.....	24
Fig. 3.8 – Configuração do pórtico para o ensaio dos provetes reforçados com a técnica EBR.	24
Fig. 3.9 – Provetes reforçados com a técnica NSM: (a) planta; (b) alçado principal; (c) alçado lateral.	25
Fig. 3.10 - Reforço dos prismas com a técnica NSM: (a) Prismas por reforçar; (b) Limpeza das ranhuras; (c) Limpeza dos laminados; (d) Colocação de máscaras nos laminados; (e) Colocação de espaçadores nos laminados; (f) Colocação do adesivo epóxi nas ranhuras; (g) Colocação do adesivo epóxi nos laminados; (h) Remoção do adesivo epóxi em excesso; (i) Provetes reforçados.	26
Fig. 3.11 – Provetes reforçados com a técnica EBR: (a) planta; (b) alçado principal; (c) alçado lateral.....	27
Fig. 3.12 – Reforço dos prismas com a técnica EBR: (a) Prismas por reforçar; (b) e (c) Colocação de espaçadores para garantir uma espessura do adesivo uniforme; (d) Colocação do adesivo epóxi nas superfícies; (e) Colocação do adesivo epóxi nos laminados; (f) Colocação do laminado na posição correta; (g) Uniformização da espessura do adesivo epóxi; (h) Cura sob carga gravítica; (i) Provetes reforçados.	28
Fig. 3.13 - Faixas de laje reforçadas com a técnica de reforço NSM: (a) e (b) Preparação da faixa de laje; (c) Colocação do adesivo epóxi nas ranhuras da faixa de laje; (d), (e) e (f) Introdução dos laminados nas ranhuras da faixa de laje.....	30

Fig. 3.14 - Faixas de laje reforçadas com a técnica de reforço EBR: (a) Faixa de laje preparada para o reforço; (b) Colocação do adesivo epóxi na superfície de betão; (c) e (d) Colocação do adesivo epóxi no laminado; (e) Colocação do laminado na faixa de laje; (f) Aplicação de pressão para garantir uma espessura de adesivo uniforme.....	32
Fig. 3.15 - Instrumentos para aplicação da técnica EBR-GA: (a) macaco hidráulico; (b) manómetros; (c) aquecedor.....	34
Fig. 3.16 – Processo de reforço da faixa de laje EBR-GA: (a) máscaras; (b) faixa de laje a ser reforçada; (c) faixa de laje reforçada.....	34
Fig. 3.17 – Instrumentos para a aplicação da técnica EBR_MA: (a) macaco hidráulico; (b) acessórios para aplicação do pré-esforço e ancoragens metálicas; (c) laminado de CFRP instrumentado; (d) e (e) caixa para aplicar o adesivo epóxi no laminado de CFRP; (f) LVDT para controlo da flecha durante a aplicação do pré-esforço.	35
Fig. 3.18 – Processo de reforço da faixa de laje EBR-MA: (a) máscaras; (b) calha para controlo da flecha durante o pré-esforço; (c) apoios da faixa de laje; (c) instrumentação do laminado de CFRP e do betão da faixa de laje; (d) adesivo a curar; (e) adesivo curado.....	36
Fig. 3.19 – Configuração dos ensaios (esquema).....	37
Fig. 3.20 – Configuração dos ensaios.....	37
Fig. 3.21 – Instrumentação dos ensaios (LVDT's).....	37
Fig. 3.22 – Secções longitudinais e transversais e extensometria: (a) laje de referência; (b) laje reforçada com a técnica NSM; (c) laje reforçada com a técnica EBR; (d) laje reforçada com a técnica EBR-GA; (e) laje reforçada com a técnica EBR-MA.....	38
Fig. 3.23 – Curvas tensão versus extensão obtidas nos ensaios de caracterização da armadura (LOTE 1).....	41
Fig. 3.24 – Curvas tensão versus extensão obtidas nos ensaios de caracterização da armadura (LOTE 2).....	42
Fig. 3.25 – Grupo de provetes do laminado de CFRP com secção transversal 10x1.4 [mm ²] ensaiados (Rolo no. 42).	43
Fig. 3.26 – Mistura do epóxi S&P Resin 220 epoxy adhesive®. (a) Adesivo epóxi; (b) Mistura dos dois componentes; (c) Componentes misturados.....	44
Fig. 3.27 – Setup dos ensaios de tração realizados.....	45
Fig. 4.1 – Ensaios de arranque direto (NSM): (a) Garra e provete de ensaio; (b) Pórtico; (c) Provete ensaiado; (d) Pormenor do modo de rotura.....	49

Fig. 4.2 – Curvas força de arranque versus deslizamento na extremidade carregada dos primas reforçados com a técnica NSM.	50
Fig. 4.3 - Ensaio de arranque direto (EBR): (a) Configuração do ensaio; (b) Configuração do ensaio; (c) Instrumentação; (d) Provete depois de ensaiado.	51
Fig. 4.4 - Curvas força de arranque versus deslizamento na extremidade carregada dos primas reforçados com a técnica EBR.	52
Fig. 4.5 – Ensaio à flexão realizados: (a) SL_REF_T0 (início); (b) SL_REF_T0 (meio); (c) SL_REF_T0 (fim); (d) SL_NSM_T0 (início); (e) SL_NSM_T0 (meio); (f) SL_NSM_T0 (fim); (g) SL_EBR_T0 (início); (h) SL_EBR_T0 (meio); (i) SL_EBR_T0 (fim); (j) SL_EBR_GA_T0 (início); (k) SL_EBR_GA_T0 (meio); (l) SL_EBR_GA_T0 (fim); (m) SL_EBR_MA_T0 (início); (n) SL_EBR_MA_T0 (meio); (o) SL_EBR_MA_T0 (fim).	54
Fig. 4.6 – Curva força versus deslocamento vertical a meio vão das faixas de laje.	55
Fig. 4.7 – Deslocamentos verticais experimentados pela faixa de laje de referência (SL_REF_T0) (a) e pelas faixas de laje reforçadas com as técnicas NSM (SL_NSM_T0) (b), EBR (SL_EBR_T0) (c), EBR-MA (SL_EBR_MA_T0) (d) e EBR-GA (SL_EBR_GA_T0) (e), para vários níveis de carregamento, até à carga máxima registada (F_{max}).	56
Fig. 5.1 – Comparação dos resultados obtidos experimentalmente com os resultados obtidos através da norma CNR-DT 200 R1/2013: (a) faixa de laje reforçada com a técnica EBR; (b) faixa de laje reforçada com a técnica EBR-GA; (c) faixa de laje reforçada com a técnica EBR-MA.	68
Fig. 5.2 – Comparação do resultado obtido experimentalmente com o resultado obtido através da norma ACI 440.2R-08.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Propriedades dos polímeros.	5
Tabela 1.2 – Propriedades mecânicas típicas dos diferentes tipos de fibras de carbono (Pusch e Wohlmann, 2018).	5
Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas à compressão do betão ensaiado.	40
Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas da armadura utilizada (LOTE 1).	41
Tabela 3.3 – Propriedades mecânicas da armadura utilizada (LOTE 2).	42
Tabela 3.4 – Propriedades mecânicas dos laminados de CFRP utilizados.	43
Tabela 3.5 – Propriedades mecânicas do adesivo epóxi utilizado.	44
Tabela 4.1 – Resultados obtidos nos ensaios de arranque direto dos prismas reforçados com a técnica NSM (valores médios).	48
Tabela 4.2 - Resultados obtidos nos ensaios de arranque direto dos prismas reforçados com a técnica EBR (valores médios).	51
Tabela 4.3 – Resultados obtidos nos ensaios à flexão das faixas de laje.	53
Tabela 5.1 – Valores dos parâmetros utilizados no cálculo da força de arranque máxima através da norma ACI 440.2R-08.	61
Tabela 5.2 – Valores dos parâmetros utilizados no cálculo da força de arranque máxima através da norma SA HB 305-2008.	62
Tabela 5.3 – Valores dos parâmetros utilizados no cálculo da força de arranque máxima através da norma CNR-DT 200 R1/2013.	64
Tabela 5.4 – Valores dos parâmetros utilizados no cálculo dos níveis de tensão pela norma CNR-DT 200 R1/2013.	66
Tabela 5.5 – Estudo dos modos de rotura.	67
Tabela 5.6 – Comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e os resultados obtidos através da norma CNR-DT 200 R1/2013.	68

1. INTRODUÇÃO

O betão armado é o material estrutural de utilização mais generalizada pelo facto de possuir características que se podem considerar ímpares tais como o baixo custo dos materiais constituintes, a elevada resistência à compressão e a diversidade de formas que pode assumir, contemplando as mais exigentes expressões arquitetónicas.

Não obstante ser um excelente material de construção, o betão armado apresenta problemas de durabilidade. Como existe hoje a consciência de que as disposições normativas são cada vez mais restritivas, os engenheiros têm trabalhado cada vez mais no sentido de desenvolver soluções que permitam, nas estruturas em que tal seja possível, aumentar o seu período de vida útil. Como muitas estruturas foram e são realizadas em betão armado, urge desenvolver soluções de manutenção (em que se procura manter o comportamento estrutural inicial), de reparação (que se traduz no restabelecimento do comportamento estrutural inicial) e de reforço (caso em que se pretende melhorar o comportamento estrutural) dessas estruturas.

De facto, a comunidade científica está empenhada em desenvolver este tipo de soluções pois permitem estender o período de vida útil deste, tornando o parque do edificado existente, mais sustentável. A presente dissertação pretende contribuir para este objetivo. As estruturas de betão armado são reparadas e/ou reforçadas há muito tempo, tipicamente recorrendo a soluções tais como o aumento de secção transversal através de uma camada de betão adicional, adição externa de chapas de aço por colagem ou ancoragem ou até mesmo através do encurtamento de vãos adicionando elementos de suporte.

Mais recentemente tem-se assistido à utilização de *carbon fiber-reinforced polymer*, doravante designado por CFRP, como material de reparação e/ou reforço.

Trata-se de uma excelente solução para reparação/reforço de estruturas de betão armado devido às suas características, nomeadamente:

- elevada resistência à tração deste material, o que permite a utilização de pequenas secções;
- leveza;
- facilidade de aplicação;
- permeabilidade eletromagnética;
- elevada resistência à corrosão.

Sendo certo que as suas características são geradoras de uma boa solução de reforço, existe grande incerteza em relação ao seu comportamento ao longo do tempo em particular, quando aplicados a estruturas de betão armado. Isto deve-se ao facto de apenas estar a ser utilizado no sector da construção há relativamente pouco tempo, não tendo ainda sido possível aferir cabalmente a durabilidade destes sistemas de reforço.

Assim, e para aumentar o grau de confiança nestas soluções de reforço, a presente dissertação inserida no projeto *FRPLongDur*, tem como principal objetivo obter resultados que permitam contribuir para diminuir a incerteza que existe relativamente à durabilidade desta tipologia de reparação/reforço.

1.1 Reforço de estruturas de betão armado

Como já foi referido, as estruturas de betão armado podem necessitar ser reparadas ou reforçadas. Esta necessidade pode ter origem na deficiente elaboração do projeto de execução, em erros de construção, em alterações de uso, em disposições normativas posteriores ao projeto mais restritivas, na falta de manutenção, na mudança do sistema estrutural, em explosões, em dano acumulado ao longo do tempo ou causado por carregamentos acidentais excessivos, na sequência de incêndios ou sismos (Heiza *et al.*, 2014). Como a substituição de estruturas com comportamento deficiente ou insuficiente requer grandes investimentos, o reforço tornou-se a opção mais adequada para melhorar a capacidade de carga e prolongar a vida da estrutura, já que é uma solução geralmente mais económica, o que justifica que tenha recebido considerável atenção nos últimos anos.

O primeiro passo no reforço de uma estrutura é muito importante e consiste na avaliação da estrutura existente. De facto, para que se desenvolva uma estratégia de reforço eficaz é necessário primeiro avaliar o estado do existente, identificar as causas que dão origem à necessidade de reforço, determinar a capacidade de carga da estrutura e selecionar e avaliar a técnica de reforço mais adequada. Assim, a avaliação da estrutura existente deve ser cuidadosamente realizada tendo em conta a análise de diversos aspetos, tais como (Costa, 2011):

- O projeto de execução da estrutura, assim como informações de eventuais alterações que tenham sido realizadas;
- A geometria dos elementos de betão armado em análise;
- As propriedades mecânicas dos materiais envolvidos;
- A quantidade e localização do aço existente;
- A localização, tamanho e causas de fissuras e/ou destacamentos;

- A localização e extensão da corrosão das armaduras;
- A quantidade/tipo de carregamentos a que a estrutura está submetida.

O estado do betão de recobrimento é um dos aspetos críticos a ser considerado quando se pretende reforçar uma estrutura. De facto, se este se encontrar degradado pode facilitar o acesso de agentes agressores às armaduras. Por outro lado, no contexto da solução de reforço que se venha a adotar, o betão deve ser capaz de transferir eficazmente os esforços da estrutura existente para o material de reforço. Assim, em alguns casos, o betão de recobrimento deve mesmo ser removido e substituído previamente à aplicação do reforço.

Aquando da escolha do método e materiais de reforço, devem ser consideradas eventuais restrições como (Heiza *et al.*, 2014):

- O acesso limitado às áreas de trabalho;
- O horário em que podem ser realizadas as intervenções;
- Os custos associados à intervenção;
- O aumento de vida útil da estrutura pretendido;
- A classe de exposição e suas implicações;
- O impacto do reforço no comportamento de elementos estruturais adjacentes;
- As restrições arquitetónicas.

Excetuando os casos em que se opta por executar novos elementos, existem diversas técnicas de reforço através das quais as estruturas de betão armado podem ser reforçadas, como por exemplo o aumento da secção transversal, a aplicação de pré-esforço externo (pós-tensão), a colocação de chapas metálicas coladas exteriormente, a adição de compósitos de FRP (*fibre-reinforced polymer*) ou uma combinação destas técnicas. O sistema deve ser escolhido com o objetivo de aumentar a vida útil da estrutura sem interferir na sua funcionalidade.

1.2 Materiais compósitos no reforço à flexão de estruturas de betão armado

Nos últimos anos, o desenvolvimento dos materiais, métodos e técnicas para o reforço estrutural tem despertado muito interesse por parte da comunidade científica e técnica, e os compósitos de FRP (*fibre-reinforced polymer*) têm sido utilizados com sucesso na reabilitação e no reforço de estruturas existentes, bem como na construção de novas estruturas.

Estes materiais afiguram-se como cada vez mais importantes na indústria da construção. A utilização de FRP no reforço estrutural é muito atrativa devido à facilidade e velocidade de execução,

requer menos mão de obra, representa uma solução eficaz para o reforço, é insuscetível à corrosão e não altera significativamente a geometria, aspeto e funcionalidade das estruturas.

Os compósitos FRP são a combinação de resinas poliméricas, funcionando como matriz, com conjuntos de fibras de elevada resistência à tração, que constituem a fase de reforço.

As principais vantagens destes compósitos são a elevada resistência à tração e leveza, a resistência à corrosão, a estabilidade geométrica (i.e., conserva as dimensões quando sujeito a mudanças de temperatura), a baixa condutividade térmica, a ausência de condutividade elétrica, a permeabilidade eletromagnética, a resistência ao impacto e os baixos custos de manutenção. As desvantagens dos compósitos FRP são o elevado custo inicial, a suscetibilidade ao dano mecânico e ao fogo, a baixa resistência ao corte e a baixa extensão na rotura.

Como já foi referido estes compósitos são constituídos por duas fases: fibras e matriz. De um modo geral, as fibras representam 30% a 70% do volume do compósito e 50% do seu peso. As principais funções das fibras são resistir aos esforços e oferecer rigidez, resistência, estabilidade térmica e outras propriedades mecânicas ao compósito. Nos compósitos FRP as fibras devem ter elevado módulo de elasticidade, elevada resistência última, baixa variação de resistência entre fibras, elevada estabilidade da resistência durante o seu manuseamento e uniformidade no diâmetro e na área de superfície entre fibras. As fibras mais relevantes para o sector da construção são: as fibras de carbono (CFRP – *carbon fiber-reinforced polymer*), as fibras de vidro (GFRP – *glass fiber-reinforced polymer*), as fibras de aramida (AFRP – *aramid fiber-reinforced polymer*) e as fibras de basalto (BFRP – *basalt fiber-reinforced polymer*) (Sonnenschein *et al.*, 2016).

Assim, o desempenho de um compósito está diretamente relacionado com o tipo das fibras e o tipo de matriz utilizados. Igualmente importante é a interface entre as fibras e a matriz. É necessário que a interface tenha estabilidade química e física para que o comportamento do compósito seja maximizado, possibilitando a transferência eficaz de tensões entre as fibras e a matriz.

Relativamente à cura dos polímeros que constituem o FRP, nas aplicações relacionadas com a construção, são dois tipos: a (i) cura a frio (temperatura ambiente) e (ii) a cura a quente. A cura a frio é geralmente usada na fixação do compósito (adesivo) e, nalguns casos, também como no seu fabrico *in situ*. A cura a quente é utilizada na fabricação de componentes compósitos num ambiente controlado. Quanto mais cuidada é a cura e a produção dos compósitos, melhores propriedades mecânicas são atingidas.

As principais matrizes termoendurecíveis utilizadas no fabrico de compósitos são: poliéster, vinil éster e epóxi. Estes polímeros são geralmente resinas líquidas ou semi-sólidas que curam de forma

irreversível e que no final do processo de cura se apresentam como um polímero sólido. Na Tabela 1.1 são apresentadas algumas propriedades destes polímeros (Hollaway, 2011).

Tabela 1.1 – Propriedades dos polímeros.

Material	Resistência específica à tração (N.m/kg)	Resistência à tração última (MPa)	Módulo de elasticidade em tração (GPa)	Coefficiente linear de expansão (10 ⁻⁶ /°C)
Poliéster	1.28	45 – 90	2.5 – 4.0	100 – 110
Vinil éster	1.07	90	4.0	80
Epóxi	1.03	90 – 110	3.5	45 – 65

Os FRP mais relevantes no reforço de estruturas de betão armado, e por isso abordados nesta dissertação, são os que têm a fase do reforço em carbono, os CFRP. Há quatro tipos de fibras de carbono: fibras com elevada resistência à tração (HS – *high strength*), fibras com módulo de elasticidade intermédio (IM – *intermediate modulus*), fibras com elevado módulo de elasticidade (HM – *high modulus*) e fibras módulo de elasticidade ultra elevado (UHM – *ultra high modulus*) – ver Tabela 1.2. A principal desvantagem das fibras de carbono é o seu custo, tendem a custar 10 a 30 vezes mais do que as fibras de vidro (Sonnenschein *et al.*, 2016).

Tabela 1.2 – Propriedades mecânicas típicas dos diferentes tipos de fibras de carbono (Pusch e Wohlmann, 2018).

Tipo de fibras de carbono	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Elevada resistência à tração (HS)	3 - 5	200 - 250
Módulo de elasticidade intermédio (IM)	4 - 5	250 - 350
Módulo de elasticidade elevado (HM)	2 - 4.5	350 - 450
Módulo de elasticidade ultra elevado (UHM)	3	>700

Existem quatro formas/geometrias principais dos compósitos que são mais utilizados no reforço de estruturas:

- 1) Mantas de fibras unidirecionais: tratam-se de mantas de fibras contínuas, sem resina, no seu estado mais simples. Esta forma é uma das mais comuns e a sua aplicação é

realizada *in situ* através da impregnação das mantas com resina para a criação do compósito;

- 2) Tecidos: são tecidos formados de fibras uniaxiais contínuas com fibras entrelaçadas na direção transversal. Devido ao entrelaçamento das fibras e consequente acumulação de resina nos nós das fibras, as propriedades mecânicas destes tecidos são ligeiramente inferiores quando comparados com as propriedades mecânicas das mantas. Relativamente ao modo de execução do reforço com recurso a esta solução é, também, comum a impregnação *in situ* dos tecidos com resina;
- 3) Laminados: são produzidos a partir de mantas e/ou tecidos pré-impregnados e/ou rovings. O processo de pré-impregnação pode incluir a utilização de autoclaves e usam temperaturas elevadas, pressão e vácuo para melhorar a qualidade do produto final. Contudo, a forma mais corrente de produção é através da pultrusão;
- 4) Varões de FRP pultrudidos: tipicamente estes varões contém 60% a 70% de fibras em relação ao volume total, sendo produzidos através de processos de pultrusão. São normalmente aplicados através da colagem com recurso a adesivo (Rasheed, 2014).

1.3 Técnicas de reforço à flexão de estruturas de betão armado com recurso a laminados de *Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP)*

Ao longo do tempo têm sido desenvolvidas várias técnicas de reforço de estruturas de betão armado que recorrem a laminados de CFRP. Contudo, as mais usadas são: (i) a técnica NSM (*near-surface mounted*) que consiste na aplicação dos laminados no interior da secção transversal do elemento de betão armado, nomeadamente no betão de recobrimento, e (ii) a técnica EBR (*externally bonded reinforcement*) que consiste na aplicação de elementos de reforço no exterior do elemento de betão armado, seja colado, fixado mecanicamente ou uma combinação das duas soluções. Uma diferença importante entre as técnicas NSM e EBR está relacionada com o modo de rotura dos sistemas de reforço. A técnica EBR, que prevê a instalação dos laminados nas faces dos elementos a reforçar, ao invés da inserção dos mesmos na secção, como no caso da técnica NSM, é mais propensa ao destacamento prematuro dos laminados.

Adicionalmente, é possível pré-esforçar os laminados, melhorando significativamente o comportamento da estrutura em serviço (El-Hacha *et al.*, 2001). Para além das técnicas anteriormente referidas nesta dissertação também serão abordadas duas técnicas de reforço de laminados pré-

esforçados com sistemas de ancoragem distintos: (i) a ancoragem mecânica (MA – *mechanical anchorage*) e (ii) a ancoragem ativada através da cura acelerada do adesivo epoxídico, que consiste na aplicação de um gradiente térmico (GA – *gradient anchorage*) (Correia *et al.*, 2015).

Como já foi referido, os sistemas de reforço ativos têm a vantagem de melhorar o comportamento do elemento reforçado em serviço, bem como melhor explorarem a resistência à tração dos laminados. Geralmente, os laminados estão longe de alcançar a capacidade última de tração quando utilizada a técnica EBR (passiva) é usada. De facto, apenas 20-30% da capacidade do material é efetivamente usada (Motavalli *et al.*, 2011).

1.3.1 *Externally Bonded Reinforcement* (EBR)

A técnica EBR é a técnica de reforço com FRP mais comum no reforço de estruturas de betão. Esta técnica, geralmente após um tratamento de superfície na superfície de betão, consiste na colagem, com um adesivo epóxi, de mantas de FRP ou laminados na superfície tracionada de betão. O objetivo do tratamento de superfície é o de remover a presença de contaminantes, remover camadas de betão frágeis e proporcionar uma superfície rugosa que promova a aderência entre o betão e o adesivo (Danraka *et al.*, 2017).

As principais razões que podem comprometer o comportamento de elementos reforçados através desta técnica são a elevada probabilidade de ocorrência de modos de rotura frágeis, principalmente pela possibilidade de ocorrer o destacamento prematuro do FRP da superfície de betão, e a vulnerabilidade dos materiais que constituem o FRP às condições ambientais. A colocação de ancoragens nas secções críticas do elemento reforçado, recorrendo a mantas de FRP em forma de U, L e X, assim como o tratamento de superfície podem adiar o fenómeno de destacamento prematuro do FRP (Jumaat *et al.*, 2011).

As principais vantagens desta técnica são a rápida e fácil instalação, o baixo custo tendo em conta o desempenho do reforço, o facto de se poder usar a estrutura reforçada rapidamente e a não necessidade de um elevado grau de especialização por parte dos aplicadores.

As principais desvantagens desta técnica residem nos modos de rotura frágeis devido à possibilidade de destacamento prematuro do FRP da superfície de betão, a vulnerabilidade dos materiais constituintes dos FRP às condições ambientais, a resistência ao fogo e a modificação da estética do elemento reforçado (Mohammad Banijamali, 2015).

1.3.2 *Near-Surface Mounted (NSM)*

A técnica de reforço NSM é uma técnica que consiste na instalação de laminados ou varões com recurso a, principalmente, adesivos epoxídicos em ranhuras previamente executadas na secção de betão a reforçar. De acordo com Emara *et al.* (2018) as principais vantagens desta técnica, quando comparada com a técnica EBR, são a menor propensão ao destacamento do betão de recobrimento, o facto de não ser necessário preparar a superfície (apenas é necessário executar as ranhuras), como o reforço está embebido na secção está intrinsecamente protegido permitindo, assim, reforçar lajes e vigas nas regiões de momentos negativos, e o facto de não alterar a estética do elemento reforçado.

O reforço através desta técnica com laminados de CFRP (que são o FRP com a maior resistência à tração) permite o reforço recorrendo a menores áreas de secção transversal de material que, por sua vez, conduz a ranhuras de menores dimensões e, conseqüentemente, menor quantidade de adesivo de enchimento.

O comportamento de elementos de betão reforçados com esta técnica está dependente de vários parâmetros dos quais se destacam o comprimento de amarração, as dimensões das ranhuras e as propriedades do adesivo.

1.3.3 *Externally Bonded Reinforcement – Mechanical Anchorage (EBR-MA)*

A técnica de reforço EBR-MA (*externally bonded reinforcement – mechanical anchorage*) é uma técnica de reforço ativa que prevê o pré-esforço dos laminados de CFRP e posterior fixação destes em ancoragens mecânicas previamente instaladas no elemento a reforçar.

Esta técnica de reforço tem como principais vantagens melhorar o comportamento em serviço do elemento reforçado e explorar melhor as capacidades mecânicas dos laminados.

Há, no mercado, várias soluções para fixar mecanicamente os laminados, em que a maioria partilha o mesmo princípio de funcionamento, nomeadamente a instalação de dispositivos no elemento a reforçar que vão, através do confinamento do laminado, impedir que este se desloque, fixando e conservando o nível de pré-esforço requerido no laminado de CFRP (Pellegrino e Sena-Cruz, 2016).

1.3.4 *Externally Bonded Reinforcement – Gradient Anchorage (EBR-GA)*

A técnica de reforço EBR-GA (*externally bonded reinforcement – gradient anchorage*) é também uma técnica de reforço ativa que se destaca da técnica de reforço EBR-MA devido ao facto de não recorrer à fixação mecânica dos laminados, obtendo-se um aspeto final mais limpo do sistema de reforço.

Como não existe ancoragem mecânica, a aplicação desta técnica de reforço ativa tem a particularidade de, por um lado, implicar uma cura acelerada do adesivo epóxi que é feita por setores e por outro, implicar a existência de um gradiente de pré-esforço ao longo do comprimento de ancoragem. Isto é, aquando da aplicação do laminado, já com a camada de adesivo epóxi aplicada, tensiona-se o mesmo até ao nível de pré-esforço pretendido, uma vez atingido esse nível de pré-esforço inicia-se a cura do adesivo epóxi na zona de ancoragem recorrendo a um dispositivo que aquece o adesivo acelerando assim a sua cura. O processo inicia-se com a cura dos setores mais interiores de ambas as extremidades do CFRP (do comprimento de ancoragem). De seguida, e após os setores interiores atingirem uma cura satisfatória, diminui-se o pré-esforço no laminado nas suas extremidades, transferindo parte do pré-esforço para as zonas previamente curadas, e repete-se os passos anteriormente descritos até que o laminado deixe de ser pré-esforçado e o último setor seja curado. Estas formas de curar o adesivo epóxi e de aplicar o pré-esforço no laminado são necessárias para evitar o destacamento prematuro do laminado. Em secções subsequentes, esta técnica será pormenorizadamente detalhada (Pellegrino e Sena-Cruz, 2016).

1.4 Objetivos da dissertação

A presente dissertação é constituída por um programa experimental cujo principal objetivo é o de caracterizar uma série de provetes chamada T0, ou a tempo zero. A dissertação está inserida num projeto de investigação chamado *FRPLongDur* que tem por objetivo avaliar a durabilidade de estruturas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP. E a caracterização desta série é de extrema importância uma vez que é parte essencial do projeto *FRPLongDur* e servirá como referência. O comportamento desta série será, no futuro, comparado com os comportamentos das restantes séries que estarão em diferentes ambientes de exposição e, assim, conseguir-se-á perceber a influência que os diferentes ambientes de exposição têm no comportamento deste tipo de reforço. Assim, os principais objetivos desta série são executar os provetes que serão utilizados no projeto *FRPLongDur* e caracterizar, através de ensaios experimentais e de simulações analíticas, o comportamento da série T0.

Para cumprir os objetivos desta dissertação foi necessário:

- (i) Efetuar uma pesquisa bibliográfica nesta área de estudo;
- (ii) Realizar uma campanha experimental onde foi necessário:
 - a) Executar os provetes de betão armado, nomeadamente faixas de laje e provetes prismáticos, para a realização de ensaios à flexão e de aderência, respetivamente;

- b) Reforçar todos os provetes com diferentes técnicas de reforço com recurso a laminados de CFRP, nomeadamente com as técnicas de reforço NSM, EBR, EBR-GA e EBR-MA;
 - c) Realizar ensaios à flexão das faixas de laje para a caracterização do comportamento destas;
 - d) Realizar ensaios de arranque direto dos provetes prismáticos para a caracterização do comportamento destes;
- (iii) Simular analiticamente, recorrendo a diferentes normas em vigor, os ensaios experimentais realizados;
- (iv) Analisar todos os resultados obtidos, retirando as conclusões necessárias que permitam a boa execução do projeto de investigação em que esta dissertação está inserida;

1.5 Estrutura da dissertação

No Capítulo 1 é apresentada uma breve revisão do estado de conhecimento dos materiais e das técnicas utilizadas na aplicação de laminados de CFRP no reforço de estruturas de betão armado.

No Capítulo 2 apresenta-se o projeto de investigação *FRPLongDur*, onde está inserida esta dissertação, e esclarece-se o contributo desta dissertação no projeto.

No Capítulo 3 mostra-se a execução e o reforço dos provetes alvos de estudo no projeto de investigação *FRPLongDur* e nesta dissertação.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios à flexão e de arranque direto realizados nesta dissertação.

No Capítulo 5 apresentam-se os resultados das simulações analíticas realizadas.

No Capítulo 6 é apresentado um resumo geral da investigação realizada, as principais conclusões retiradas e sugestões para trabalhos futuros.

2. PROJETO *FRPLONGDUR*

2.1 Motivação

Os laminados de FRP (*fiber-reinforced polymer*) têm vindo a ser utilizados com sucesso na construção de novas estruturas e na reabilitação e no reforço de estruturas existentes. Além disso, os engenheiros consideram promissora a utilização destes materiais compósitos no futuro da indústria da construção (Heiza *et al.*, 2014).

Dependendo da localização geográfica, os FRP estão expostos a diferentes condições ambientais que podem influenciar o seu comportamento. Em particular, o comportamento da ligação FRP-betão depende não só das propriedades dos FRP, da severidade da exposição ambiental (Sen, 2015), mas também do tipo de adesivo utilizado, da técnica de reforço, do tipo de betão e da preparação da superfície e da qualificação da mão-de-obra responsável pela aplicação. Contudo, mesmo quando cumpridas todas as melhores práticas na aplicação das técnicas de reforço, as condições ambientais podem levar, ao longo do tempo, à deterioração da ligação. Justifica-se, assim, estudar a relação entre a durabilidade de ligações FRP-betão em função das condições ambientais e prever em que medida essas condições contribuem para a deterioração das ligações. Por outro lado, os eventuais danos à mesoescala (ao nível da ligação) poderão ter magnitudes de influência distintas quando aplicados à escala real, i.e. em elementos estruturais, justificando também estudos dedicados a esta última escala e, se possível, correlacioná-los com os existentes à mesoescala.

2.2 Objetivos

O principal objetivo do projeto *FRPLongDur* (FCT - PTDC/ECM-EST/1282/2014) é contribuir para o conhecimento do comportamento a longo prazo e da durabilidade de elementos de betão armado reforçados com laminados de CFRP (*carbon fiber-reinforced polymer*) de acordo com as técnicas NSM (*near-surface mounted*) e EBR (*externally bonded reinforcement*), aplicados de forma ativa e passiva, sob diferentes condições ambientais, conforme se ilustra na Fig. 2.1.

Para que o objetivo principal do projeto seja atingido com sucesso, concebeu-se um programa experimental destinado a avaliar o comportamento a longo prazo e sob diferentes condições ambientais incluindo o estudo:

- (i) Dos materiais envolvidos, nomeadamente laminados de CFRP, adesivo epóxi e betão;
- (ii) Da aderência entre laminados de CFRP e provetes de betão;
- (iii) De faixas de laje reforçadas à flexão com laminados de CFRP.

Para além desta avaliação experimental, pretendem-se ainda desenvolver modelos numéricos que sejam capazes de prever o comportamento à flexão de lajes reforçadas com laminados de CFRP.

Com os resultados do programa experimental e dos modelos numéricos, espera-se produzir recomendações de projeto relativas à utilização de laminados de CFRP no reforço de estruturas de betão armado tendo em consideração as diferentes condições ambientais estudadas.

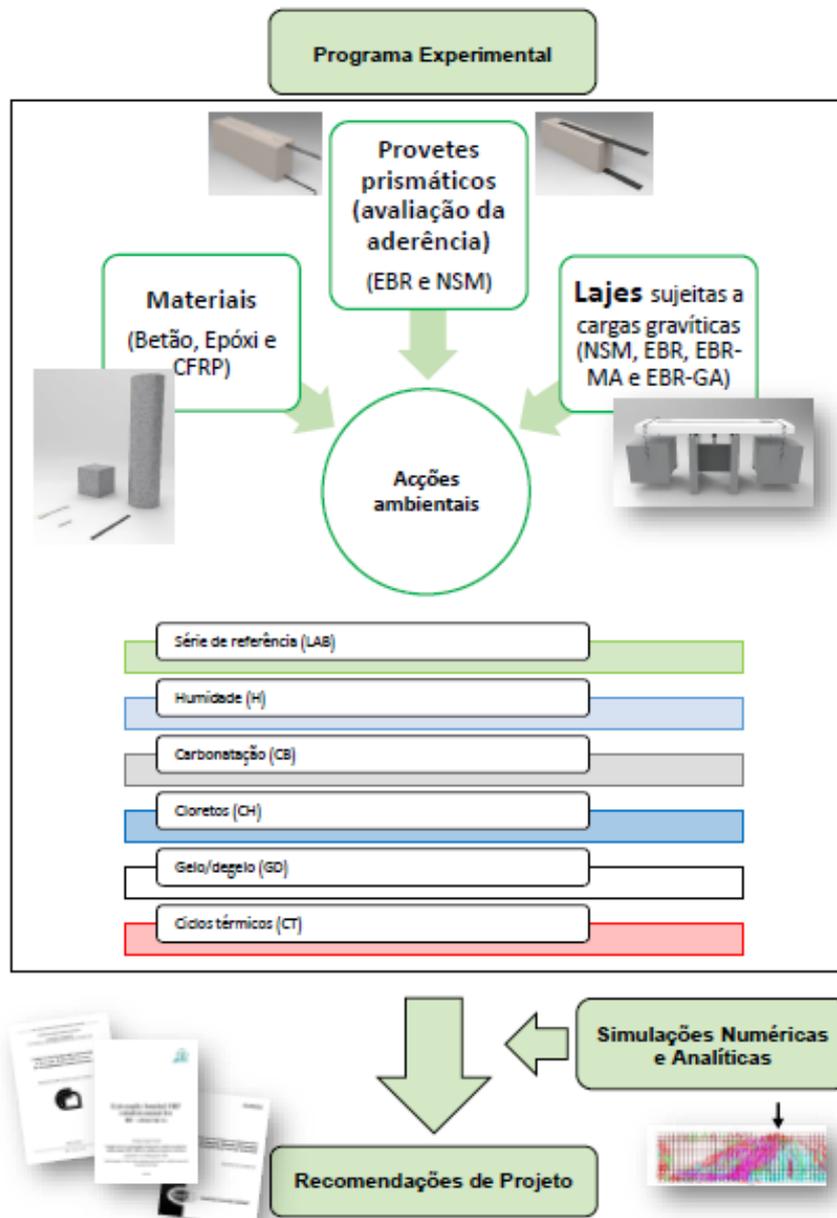


Fig. 2.1 – Fluxograma do projeto *FRPLongDur*.

2.3 Metodologia

Na fase de concepção do projeto realizou-se um conjunto de estudos preliminares (Soares, 2017) com a finalidade de contribuir para a tomada de decisões que ajudassem a garantir o principal objetivo supracitado.

Os estudos preliminares realizados podem ser divididos em duas partes:

- (i) programa experimental;
- (ii) modelos numéricos.

Na primeira parte foram caracterizados os materiais, nomeadamente o betão, os varões de aço, o adesivo epóxi e os laminados de CFRP. Levaram-se a cabo ensaios de caracterização do comportamento de aderência entre o laminado de CFRP e a superfície de betão, e ensaios de flexão em faixas de laje para se determinar a melhor configuração de reforço a utilizar no projeto. Na segunda parte foram desenvolvidos modelos de elementos finitos para simular numericamente os ensaios experimentais realizados. Este estudo preliminar acabou por se revelar fundamental para a concepção do programa experimental a implementar.

Tal como referido anteriormente o projeto engloba três componentes:

- (i) Um programa experimental alargado e de longo prazo;
- (ii) Várias simulações numéricas a distintas escalas com modelos multi-físicos;
- (iii) Elaboração de recomendações de projeto.

Para o desenvolvimento do programa experimental de longo prazo foram consideradas duas escalas: (i) provetes para ensaios de caracterização dos materiais (doravante designados MT, do inglês “material tests”) e da aderência betão/FRP (BT de “bond tests”) e (ii) provetes para ensaios à escala real com recurso a faixas de laje (ST de “slab tests”). As simulações numéricas serão realizadas recorrendo a softwares de elementos finitos, em particular ao *FEMIX* (Sena-Cruz *et al.*, 2014). Por último, as recomendações de projeto serão baseadas nos resultados das anteriores componentes do projeto.

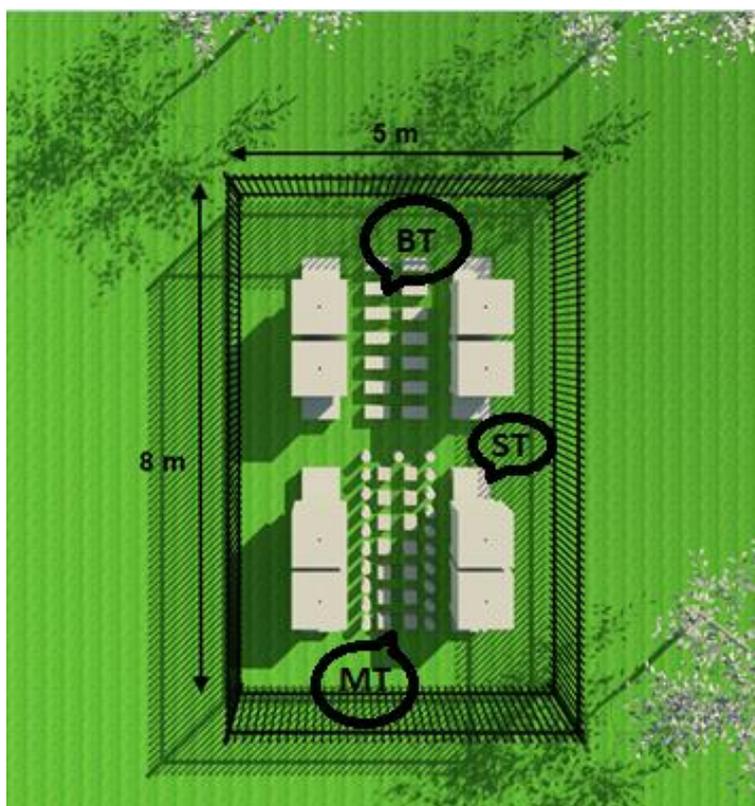
Como o objetivo do projeto é o de contribuir para o conhecimento do comportamento da durabilidade a longo prazo do reforço de estruturas de betão armado com recurso a laminados de CFRP, decidiu-se colocar séries de provetes (MT + BT + ST) em diferentes ambientes reais, conforme se indica esquematicamente na Fig. 2.2. Os ambientes reais foram escolhidos para que fosse possível avaliar o efeito ao longo do tempo dos principais agentes responsáveis na vida útil das estruturas de betão armado reforçadas. Assim, foram selecionadas diferentes condições ambientais de modo a promover envelhecimento:

- (i) Por indução de carbonatação;

- (ii) Humidade;
- (iii) Indução de cloretos;
- (iv) Ciclos térmicos;
- (v) Ciclos de gelo/degelo.



(a)



(b)

Fig. 2.2 – Série de provetes (MT + BT + ST): (a) vista 3D; (b) planta.

A carbonatação do betão resulta da reação do hidróxido de cálcio existente nos elementos de betão com o dióxido de carbono do ar envolvente. Tal reação, provoca a deterioração do betão nomeadamente através da despassivação das armaduras. Na presença de água e oxigénio, o processo de corrosão das

armaduras poderá ser acelerado. Apesar de bem conhecidos estes efeitos ao nível das estruturas de betão armado, quando em presença de estruturas reforçadas com FRP, os efeitos da carbonatação, não são bem conhecidos, justificando-se a presença de estudos dedicados.

A humidade é um fator importante a considerar, quer na corrosão das armaduras, quer na degradação do betão. No caso particular de técnicas de reforço com CFRP, a humidade pode afetar fundamentalmente o adesivo epoxídico responsável pela ligação entre este reforço e o betão. Estudos existentes na literatura têm demonstrado a ocorrência de plasticização do epóxi na presença de água, conduzindo a reduções das propriedades mecânicas da ordem dos 50% (Silva *et al.*, 2016). A análise do efeito da humidade no âmbito dos estudos previstos no presente projeto constitui também um valioso contributo para aprofundar o conhecimento existente.

Também a presença de iões cloreto nas imediações dos elementos de betão armado pode levar à degradação das armaduras e, por isso, o ambiente marinho pode afetar negativamente as estruturas de betão armado. À semelhança do fenómeno da carbonatação, este também poderá afetar as estruturas reforçadas com CFRP a distintos níveis justificando a necessidade de mais estudos.

Por sua vez, a ocorrência de grandes amplitudes térmicas e efeitos gelo/degelo provoca também uma deterioração do betão. Esta ainda é mais agravada quando em presença de técnicas de reforço, visto que os adesivos de origem epoxídica (necessários nestes reforços) são bastante suscetíveis a estas condições ambientais, para além do facto de apresentarem coeficientes de dilatação térmica distintos dos do betão (4 a 6 vezes superiores).

Para que se consigam estudar os efeitos provocados por estas condições ambientais, previu-se a colocação de séries de provetes (MT + BT + ST) em diferentes ambientes reais representativos dessas condições. Assim, os locais de Portugal continental onde os provetes estarão sujeitos às ações referidas anteriormente são as cidades de Guimarães, Matosinhos, Lisboa, Guarda e Elvas (Fig. 2.3).

A escolha destas cidades teve como principal critério as condições ambientais normalmente aí existentes, e também critérios como o da facilidade de acesso/monitorização ou a existência de locais onde as séries pudessem ser colocadas. Assim, para o estudo do efeito dos cloretos foi escolhido o Terminal de Cruzeiros de Leixões, em Matosinhos, pois trata-se de uma zona costeira onde há forte presença de cloretos na atmosfera. A carbonatação será estudada em Lisboa, nomeadamente nas instalações do LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) pois trata-se de uma área com níveis elevados de dióxido de carbono na atmosfera. O efeito do gelo/degelo será estudado na cidade da Guarda, que está no distrito com a maior altitude de Portugal continental, onde, no inverno, as temperaturas são frequentemente negativas. Elvas, no distrito de Portalegre, é uma cidade cujo clima se

caracteriza pelas elevadas amplitudes térmicas, razão pela qual foi a cidade escolhida para avaliar o efeito dos ciclos térmicos. O efeito da humidade será avaliado por imersão da respetiva série de provetes num tanque com água, sendo o estudo realizado num Laboratório de Estruturas (LEST) do Departamento de Estruturas da Universidade do Minho na cidade de Guimarães por uma questão de conveniência, já que existe a possibilidade de se utilizar as infraestruturas, para além de que a série será facilmente monitorizada. Ainda no LEST haverá outra série que ficará numa câmara climática, a temperatura (20 °C) e humidade relativa (50%) constantes ao longo de todo o programa experimental, que servirá como série de referência.



Fig. 2.3 - Localização dos ambientes reais. E1 – Referência (Guimarães); E2 – Humidade (Guimarães); E3 – Carbonatação (Lisboa); E4 – Cloretos (Porto); E5 – Gelo/degelo (Guarda); E6 – Temperaturas elevadas (Elvas).

Em cada um dos locais já mencionados serão colocados provetes para a caracterização dos materiais, da aderência CFRP/betão e do comportamento à flexão das técnicas de reforço estudadas (NSM e EBR). Será necessária uma área de cerca de 5.0×8.0 [m²] para armazenamento dos diferentes provetes, e existirá uma vedação para prevenir atos de vandalismo (Fig. 2.2).

Em cada local, as quatro faixas de laje reforçadas com as técnicas passivas NSM e EBR e com as técnicas ativas EBR-MA (*externally bonded reinforcement – mechanical anchorage*) e EBR-GA (*externally bonded reinforcement – gradient anchorage*), estarão sujeitas a um carregamento de valor constante (com recurso a cargas gravíticas) e terão monitorizadas as flechas bem como a extensão a meio vão das

mesmas. A existência de um estudo de tensão permanente nas faixas de laje tem como objetivo avaliar os efeitos sinérgicos das condições ambientais e carregamento. Por outro lado, constitui uma situação mais próxima da realidade. Além da monitorização das faixas de laje, será também colocado um sensor em cada local que medirá periodicamente o valor da temperatura e da humidade relativa.

Deve ainda referir-se que, tendo o projeto uma duração de 3 anos, o programa experimental, que incluirá sistemas de monitorização permanente, irá prosseguir para além da data de conclusão administrativa do projeto, por um período mínimo de 10 anos. Os resultados obtidos no programa experimental serão usados na previsão do comportamento em serviço tendo como base modelos numéricos.

Uma das etapas do projeto *FRPLongDur* é a realização de ensaios de uma série de provetes (MT + BT + ST) aquando da colocação das restantes séries nos diferentes ambientes. No que se segue, esta série será designada como série "T0". A série T0 permitirá estabelecer uma referência do comportamento dos provetes que serão posteriormente estudados. Com o comportamento desta série conhecido, será possível perceber e comparar a evolução das restantes séries no tempo e nos diferentes ambientes de exposição.

2.4 Contributo da presente dissertação no âmbito do FRPLongDur

A contribuição da presente dissertação de Mestrado no âmbito do projeto *FRPLongDur* foi:

- (i) Colaboração na execução dos provetes de estudo;
- (ii) Realização dos ensaios da série T0 e respetiva análise dos resultados.

O contributo para a execução dos provetes de estudo foi parcial, uma vez que aquando do início desta dissertação a betonagem dos provetes já havia ocorrido. Assim, a contribuição efetiva verificou-se nas seguintes tarefas:

- Execução do tratamento de superfície (jato de areia);
- Aplicação dos laminados nos provetes prismáticos (técnicas NSM e EBR) para os ensaios de aderência;
- Aplicação do reforço nas faixas de laje (técnicas NSM, EBR, EBR-MA e EBR-GA);
- Execução dos provetes do adesivo epoxídico.

No que respeita à realização dos ensaios da série T0 e respetiva análise dos resultados, o signatário da presente dissertação teve total contributo.

3. INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

3.1 Programa Experimental

O programa experimental realizado no âmbito desta dissertação teve como principal objetivo caracterizar uma série de provetes, nomeadamente a série T0 que servirá de referência para os futuros programas experimentais realizados no âmbito do projeto *FRPLongDur*. Como já foi referido, o projeto *FRPLongDur* tem como principal objetivo avaliar a influência de diversos ambientes de exposição na durabilidade de diferentes técnicas de reforço com recurso a laminados de CFRP (*carbon fiber-reinforced polymer*). Assim, resumidamente, foram executadas sete séries de provetes que foram colocadas em diferentes ambientes de exposição por um período previsto de 10 anos. E, para que se perceba e se possa quantificar a degradação do comportamento das técnicas de reforço, foi executada uma série adicional cuja caracterização é objeto de ensaio e análise nesta dissertação. Como a série em causa foi ensaiada aquando da colocação das diferentes séries nos respetivos ambientes de exposição, foi designada de série T0, ou a tempo zero.

Previamente à materialização das diferentes séries que compõem o projeto *FRPLongDur*, foi executado um programa experimental preliminar que importa referir, já que foi este que serviu de base à conceção do projeto *FRPLongDur*. Esse programa experimental, respetivos ensaios e análises foi determinante, pois permitiu definir alguns parâmetros chave, nomeadamente, configuração de ensaios de aderência de acordo com a técnica EBR (*externally bonded reinforcement*), soluções de reforço das faixas de laje EBR e NSM (*near-surface mounted*) e protocolos de simulação numérica (Soares, 2017).

3.2 Preparação dos provetes

A campanha experimental do *FRPLongDur*, que inclui os provetes usados no âmbito desta dissertação começou pela execução de 29 faixas de laje em betão armado, 1 sem reforço e 28 reforçadas recorrendo a quatro técnicas de reforço à flexão, e de 180 prismas de betão, metade reforçada com a técnica de reforço NSM e metade reforçada com a técnica de reforço EBR.

A preparação dos provetes pode ser dividida em duas partes: (i) a fase de execução dos provetes em betão e respetivos tratamentos de superfície e (ii) a fase de aplicação do reforço nos mesmos (aplicação dos laminados de CFRP).

Assim, a primeira fase consistiu, simplificadamente, na construção de cofragens, montagem de armaduras, colocação da instrumentação, betonagem e tratamentos de superfície, como se ilustra na Fig. 3.1.



Fig. 3.1 – Perspetiva geral das cofragens utilizadas.

Foi necessária a construção de três tipos de cofragens distintas: (i) uma para as faixas de laje, (ii) uma para os provetes cúbicos para posterior reforço com a técnica NSM e (iii) uma para os provetes com forma paralelepipedica para posterior reforço com a técnica EBR - ver Fig. 3.2.

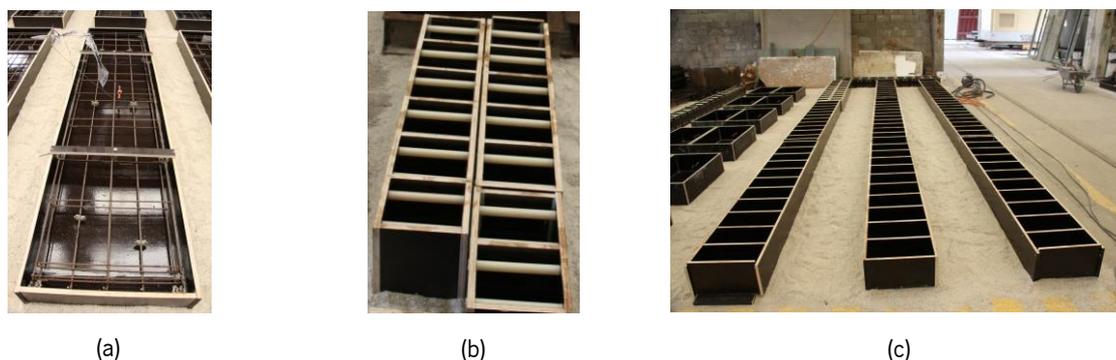


Fig. 3.2 – Cofragens: (a) cofragem para as faixas de laje; (b) cofragem para os provetes cúbicos; (c) cofragem para os provetes paralelepipedicos.

De seguida foram executadas e colocadas as armaduras e procedeu-se à instrumentação das faixas de laje. A instrumentação consistiu na colocação de dois extensómetros na armadura e de um extensómetro de corda vibrante que ficaria embebido no betão de cada faixa de laje - ver Fig. 3.3.



Fig. 3.3 – Instrumentação nas faixas de laje.

As tarefas necessárias à betonagem dos provetes foram, por ordem cronológica, as seguintes (ver ilustrações na Fig. 3.4): i) aplicação de um óleo descofrante nas cofragens, ii) colocação de betão nas cofragens, iii) vibração do betão para a redução do número e dimensão de vazios, aumento da compacidade deste, preenchimento da cofragem e correto envolvimento das armaduras, e iv) retificação das superfícies de betão expostas (face superior).



Fig. 3.4 – Betonagem.

Aquando da betonagem dos provetes foi avaliado o *slump* (ensaio de abaixamento) e ainda betonados cilindros para que fossem posteriormente ensaiados com vista à caracterização do betão utilizado, bem como cilindros que vão ser colocados nos ambientes objeto de estudo – ver Fig. 3.5. No Capítulo 4 são apresentadas e discutidas as características do betão utilizado.



Fig. 3.5 – Caracterização do betão utilizado: (a) e (b) ensaio de *slump*; (c) vibração do betão dos cilindros.

As etapas seguintes consistiram na preparação das superfícies dos provetes e aplicação dos laminados de CFRP.

No caso dos provetes onde foi aplicada a técnica EBR, procedeu-se ao tratamento da respetiva superfície com jato de areia. O tratamento de superfície com jato de areia foi realizado nas faixas de laje e provetes prismáticos, conforme se pode observar na Fig. 3.6, que foram, posteriormente, reforçados com as técnicas EBR, EBR-MA (*externally bonded reinforcement – mechanical anchorage*) e EBR-GA (*externally bonded reinforcement – gradient anchorage*). No que respeita aos provetes usados com a técnica NSM, foram realizados rasgos (ranhuras) nas faixas de laje e provetes prismáticos.



Fig. 3.6 – Tratamento de superfície (jato de areia).

3.2.1 Ensaio de arranque direto

O estudo da aderência das técnicas EBR e NSM realizou-se através de ensaios de arranque direto.

Para efetuar os ensaios de arranque direto, com o objetivo de analisar o comportamento da ligação CFRP-betão, recorreu-se a provetes prismáticos de betão de dimensões 200x200x400 mm³ no caso dos provetes reforçados com a técnica EBR, e a provetes prismáticos de betão de dimensões 200x200x200 mm³ no caso dos provetes reforçados com a técnica NSM, tendo sido em ambos os casos aplicados laminados com as respetivas técnicas de reforço em duas faces opostas. Na Fig. 3.7 representa-se a configuração de ensaio de arranque direto dos provetes reforçados com a técnica NSM, enquanto que na Fig. 3.8 está representada a configuração de ensaio de arranque direto dos provetes reforçados com a técnica EBR. Na Fig. 3.9 é apresentada a geometria dos provetes prismáticos reforçados com a técnica NSM, e na Fig. 3.11 é apresentada a geometria dos provetes reforçados com a técnica EBR. É importante realçar o facto da zona de ancoragem do laminado de CFRP à superfície de betão começar a uma distância de 100 mm da face dos provetes, para que seja evitada a rotura prematura provocada pela formação de um cone de betão na extremidade carregada. No caso dos provetes reforçados com a técnica NSM foi adotada uma configuração de ensaio em que os provetes são fixados verticalmente, estando o eixo longitudinal do sistema hidráulico também na vertical – ver Fig. 3.7. Nos ensaios dos provetes reforçados com a técnica NSM, os provetes de betão foram colocados verticalmente sobre uma peça metálica em aço (suporte S1 de acordo com a Fig. 3.7) com 70 mm de espessura, 300 mm de largura e 200 mm de comprimento, encontrando-se esta fixa ao pórtico rígido através de 4 varões roscados M16, aos quais foi aplicado um momento de aperto de 20 Nxm. Para acomodar algumas imperfeições geométricas provenientes da fase da betonagem, foram adicionadas ao sistema chapas metálicas com espessuras de 0.8 mm, 1.2 mm e/ou 2 mm, sendo colocadas entre o suporte S1 e a face inferior do provete de betão, de modo a que o ensaio se realize sem qualquer excentricidade. Cada provete prismático foi impedido de se deslocar na direção do carregamento, através de uma peça metálica em aço de suporte superior (suporte S2 de acordo com a Fig. 3.7), que funcionou como elemento de reação, encontrando-se fixo ao suporte S1 através de quatro varões roscados M20.

No caso dos provetes reforçados com a técnica EBR estabeleceu-se uma configuração de ensaio em que os provetes são colocados na horizontal, estando o eixo longitudinal do sistema hidráulico também na horizontal – ver Fig. 3.8. Nos ensaios dos provetes reforçados com a técnica EBR, os provetes de betão foram colocados horizontalmente sobre uma peça metálica em aço (suporte S1 de acordo com a Fig. 3.8) com 70 mm de espessura, 300 mm de largura e 550 mm de comprimento, encontrando-se esta fixa ao pórtico rígido através de 8 varões roscados M16, aos quais foi aplicado um momento de

aperto de 20 Nxm. Para acomodar algumas imperfeições geométricas provenientes da fase da betonagem, o sistema foi complementado com chapas metálicas de espessuras 0.8 mm, 1.2 mm e/ou 2 mm, sendo estas colocadas entre o suporte S1 e a face inferior do provete de betão, de modo a que o ensaio se realize sem qualquer excentricidade. Cada provete prismático foi impedido de se deslocar na direção do carregamento, através de uma peça metálica em aço de suporte inferior (suporte S2 de acordo com a Fig. 3.8), que funcionou como elemento de reação numa altura de 50 mm, encontrando-se fixo ao suporte S1 através de dois varões roscados M20. Além disso, um elemento de suporte superior em aço de dimensões 50x70x300 mm³ (suporte S3 de acordo com a Fig. 3.8) foi colocado soba a parte traseira do provete e fixo ao suporte S1 através de dois varões roscados M20, de modo a garantir que o deslocamento vertical do provete nessa zona, durante o ensaio, fosse desprezável.

Os ensaios foram realizados com recurso a um sistema hidráulico servo-controlado, sendo a força de arranque medida através de uma célula de carga (cuja capacidade máxima é de 200 kN e a precisão de 0.05% F.S.) colocada entre o atuador e a garra onde o laminado é fixo.

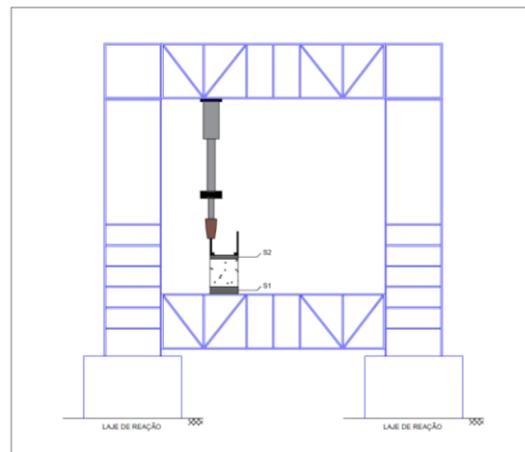


Fig. 3.7 – Configuração do pórtico para o ensaio dos provetes reforçados com a técnica NSM.

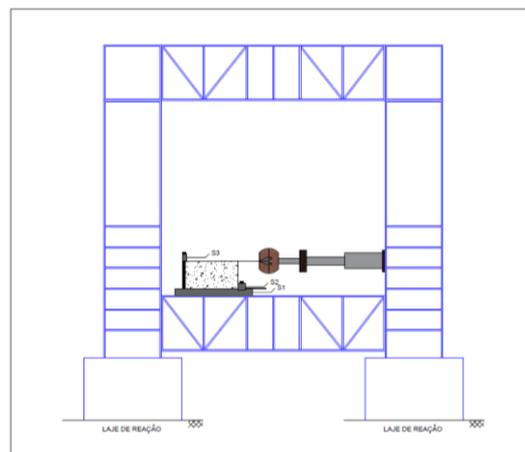


Fig. 3.8 – Configuração do pórtico para o ensaio dos provetes reforçados com a técnica EBR.

O grupo de provetes reforçado com a técnica NSM foi reforçado com laminados de CFRP com secção transversal de $10 \times 1.4 \text{ mm}^2$, que foram inseridos e colados com adesivo epóxi em ranhuras previamente executadas com secção transversal de $15 \times 5 \text{ mm}^2$ como se ilustra na Fig. 3.9.

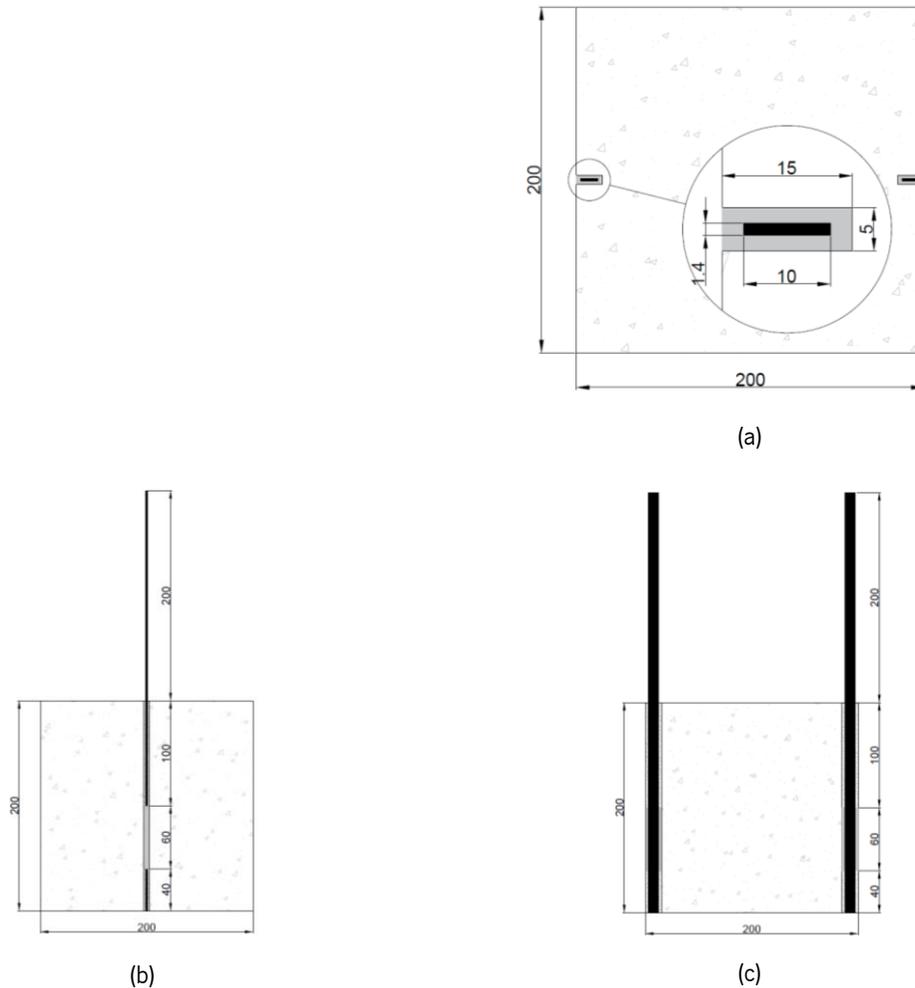


Fig. 3.9 – Provetes reforçados com a técnica NSM: (a) planta; (b) alçado principal; (c) alçado lateral.

O reforço destes provetes com a técnica NSM, já com os cubos betonados e com as ranhuras executadas, implicou uma série de tarefas, designadamente (ver algumas ilustrações na Fig. 3.10):

- 1) Limpeza da ranhura (com ar comprimido);
- 2) Limpeza do laminado (com papel e acetona);
- 3) Colocação de máscaras no laminado para garantir o comprimento de amarração;
- 4) Colocação de espaçadores no laminado para garantir que este fica centrado em relação à secção transversal da ranhura;
- 5) Mistura do adesivo epóxi;
- 6) Colocação do adesivo epóxi na ranhura;
- 7) Colocação do adesivo epóxi no laminado;

- 8) Introdução do laminado na ranhura;
- 9) Remoção do adesivo epóxi em excesso;
- 10) Remoção das máscaras.

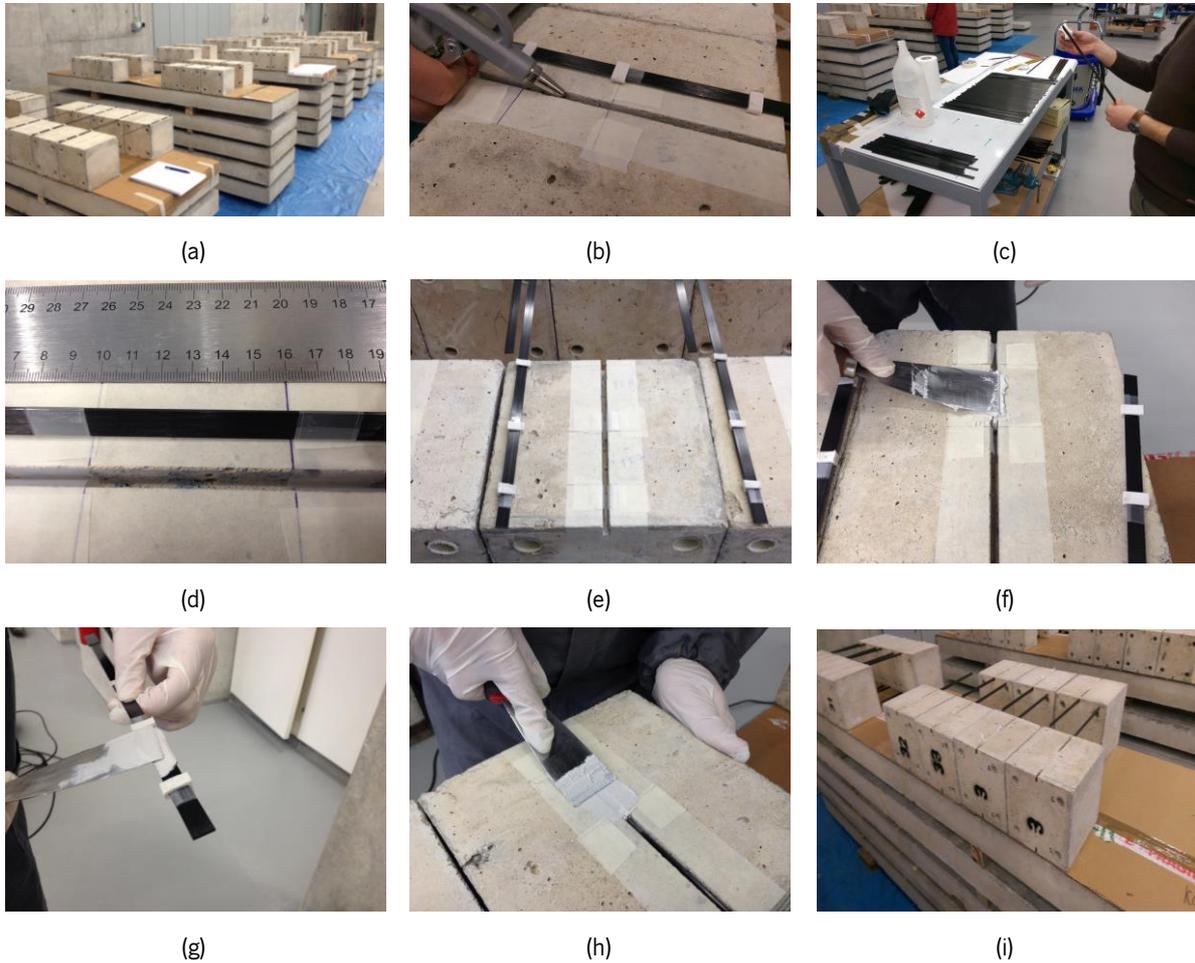


Fig. 3.10 - Reforço dos prismas com a técnica NSM: (a) Prismas por reforçar; (b) Limpeza das ranhuras; (c) Limpeza dos laminados; (d) Colocação de máscaras nos laminados; (e) Colocação de espaçadores nos laminados; (f) Colocação do adesivo epóxi nas ranhuras; (g) Colocação do adesivo epóxi nos laminados; (h) Remoção do adesivo epóxi em excesso; (i) Provetes reforçados.

O grupo de provetes relativos à técnica EBR foi reforçado com laminados de CFRP com secção transversal de $50 \times 1.2 \text{ mm}^2$, que foram colados com adesivo epóxi em faces opostas nas quais foi previamente executado um tratamento de superfície recorrendo ao jato de areia conforme se ilustra na Fig. 3.11.

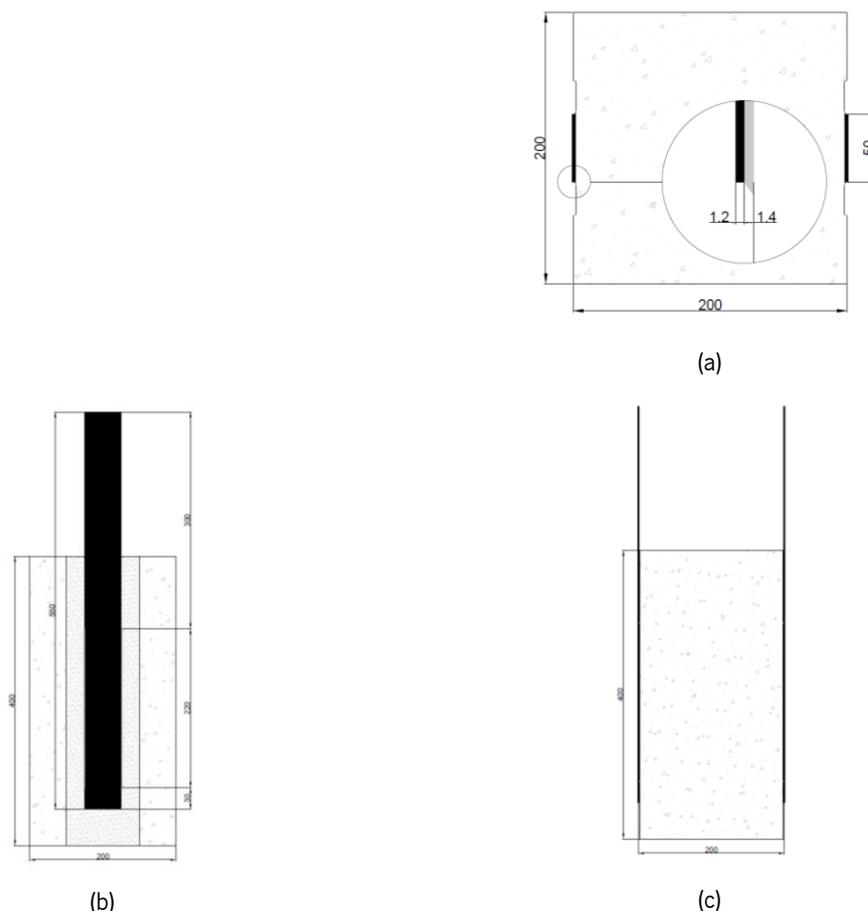


Fig. 3.11 – Provetes reforçados com a técnica EBR: (a) planta; (b) alçado principal; (c) alçado lateral.

O reforço destes provetes com a técnica EBR implicou o seguinte conjunto de tarefas (ver algumas ilustrações na Fig. 3.12):

- 1) Limpeza da superfície de betão (com ar comprimido);
- 2) Limpeza do laminado (com papel e acetona);
- 3) Colocação de máscaras no laminado para garantir o comprimento de amarração;
- 4) Colocação de espaçadores na superfície de betão onde será colocado o laminado para garantir uma espessura de adesivo epóxi uniforme;
- 5) Mistura do adesivo epóxi;
- 6) Colocação do adesivo epóxi na superfície de betão;
- 7) Colocação do adesivo epóxi no laminado;
- 8) Colocação do laminado na superfície de betão;
- 9) Colocação de uma régua e de um peso sobre o laminado e espaçadores para garantir uma espessura de adesivo epóxi uniforme;
- 10) Remoção do adesivo epóxi em excesso;

11) Remoção das máscaras.



3.2.2 Ensaio de flexão

Os ensaios de flexão em faixas de laje realizados nesta investigação experimental, tiveram como principal objetivo caracterizar o comportamento à flexão destas, a tempo zero, quando aplicadas as técnicas de reforço à flexão NSM, EBR, EBR-GA e EBR-MA e ainda de uma faixa de laje sem reforço.

As faixas de laje de betão armado adotadas tinham 2600 mm de comprimento, 600 mm de largura e 120 mm de altura. A armadura longitudinal inferior era constituída por cinco varões com 8 mm de diâmetro (5Ø8), o que corresponde a uma taxa de armadura longitudinal de tração (ρ) de 0.44%. A armadura longitudinal superior era, por sua vez, constituída por três varões com 6 mm de diâmetro (3Ø6) e a armadura de distribuição transversal consistiu na colocação de estribos com 6 mm de diâmetro espaçados de 300 mm (Ø6@0.3m). Esta solução de armaduras de reforço estrutural e sistema estrutural (condições de apoio e aplicação da carga) foi dimensionada de modo a que a rotura por esforço transversal de todas as faixas de laje (faixa de laje de referência e faixas de laje reforçadas com laminados de CFRP) fosse evitada, para além de ter sido assegurada a plastificação das armaduras de flexão sujeitas a esforços de tração. Foi adotado um recobrimento de 20 mm. Os laminados de CFRP, que constituem os elementos de reforço, foram aplicados num comprimento de 2200 mm, ficando uma extensão de faixa de laje de 200 mm sem reforço em cada uma das extremidades. Assim, foi assegurada a ausência do efeito de confinamento promovido pelos apoios nas extremidades em relação às técnicas de reforço.

Como já foi referido, as faixas de laje foram reforçadas com diferentes técnicas de reforço que recorrem a laminados de CFRP. E para cada uma das técnicas de reforço foi necessário realizar diferentes procedimentos. Algumas das tarefas dos procedimentos são comuns a todas as técnicas, como por exemplo a limpeza das superfícies de betão ou a limpeza dos laminados de CFRP, mas as restantes não, por isso são, de seguida, descritos individualmente os procedimentos a realizar para o reforço das faixas de laje.

As tarefas necessárias à execução do reforço das faixas de laje reforçadas com a técnica NSM foram as seguintes (ver ilustrações na Fig. 3.13):

- 1) Limpeza dos laminados (com papel e acetona);
- 2) Limpeza das ranhuras (com ar comprimido);
- 3) Mistura do adesivo epóxi;
- 4) Colocação do adesivo epóxi nas ranhuras;
- 5) Colocação do adesivo epóxi nos laminados;
- 6) Introdução dos laminados nas ranhuras da faixa de laje;
- 7) Remoção do adesivo epóxi em excesso;
- 8) Remoção das máscaras.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 3.13 - Faixas de laje reforçadas com a técnica de reforço NSM: (a) e (b) Preparação da faixa de laje; (c) Colocação do adesivo epóxi nas ranhuras da faixa de laje; (d), (e) e (f) Introdução dos laminados nas ranhuras da faixa de laje.



(g)



(h)

Fig. 3.13 (cont.) - Faixas de laje reforçadas com a técnica de reforço NSM: (g) Ainda com as máscaras; (h) Aspecto final.

As tarefas necessárias à execução do reforço das faixas de laje reforçadas com a técnica EBR foram as seguintes (ver ilustrações na Fig. 3.14):

- 1) Limpeza do laminado (com papel e acetona);
- 2) Limpeza da superfície de betão (com ar comprimido);
- 3) Mistura do adesivo;
- 4) Colocação do adesivo epóxi na superfície de betão;
- 5) Colocação do adesivo epóxi no laminado;
- 6) Colocação do laminado na superfície de betão;
- 7) Remoção do adesivo epóxi em excesso;
- 8) Remoção das máscaras.



(a)



(b)



(c)



(d)

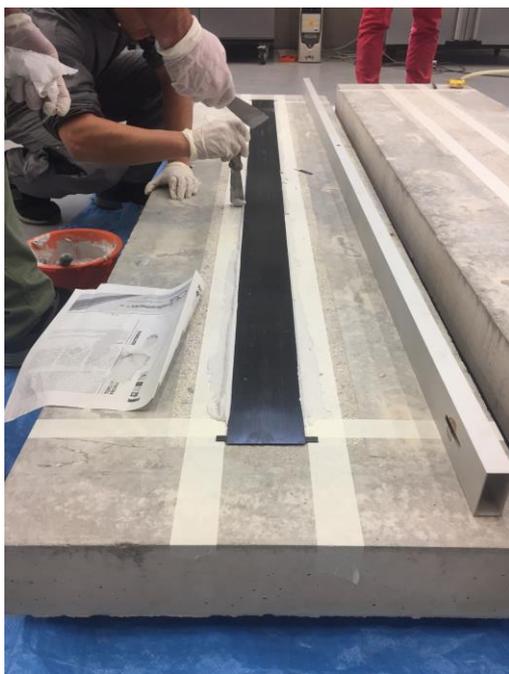


(e)



(f)

Fig. 3.14 - Faixas de laje reforçadas com a técnica de reforço EBR: (a) Faixa de laje preparada para o reforço; (b) Colocação do adesivo epóxi na superfície de betão; (c) e (d) Colocação do adesivo epóxi no laminado; (e) Colocação do laminado na faixa de laje; (f) Aplicação de pressão para garantir uma espessura de adesivo uniforme.



(g)



(h)

Fig. 3.14 (cont.) - Faixas de laje reforçadas com a técnica de reforço EBR: (g) remoção do adesivo epóxi em excesso; (h) remoção das máscaras.

As tarefas necessárias à execução do reforço das faixas de laje reforçadas com a técnica EBR-GA, bem como os instrumentos necessários para a aplicação desta técnica (ver ilustrações na Fig. 3.15), foram os seguintes (ver ilustrações na Fig. 3.16):

- 1) Limpeza do laminado (com papel e acetona);
- 2) Limpeza da superfície (com ar comprimido);
- 3) Mistura do adesivo epóxi;
- 4) Colocação do adesivo epóxi na superfície de betão;
- 5) Colocação do adesivo epóxi no laminado;
- 6) Colocação do laminado na faixa de laje;
- 7) Fecho das garras;
- 8) Colocação do sistema de aquecimento do epóxi;
- 9) Colocação dos macacos hidráulicos nas extremidades do laminado;
- 10) Aplicação do pré-esforço;
- 11) Início do aquecimento dos primeiros sectores (de cada extremidade);
- 12) Libertação do primeiro 1/3 do pré-esforço;
- 13) Início do aquecimento dos segundos sectores (de cada extremidade);
- 14) Libertação do segundo 1/3 do pré-esforço;
- 15) Início do aquecimento dos terceiros sectores (de cada extremidade);

16) Libertação do terceiro 1/3 do pré-esforço.

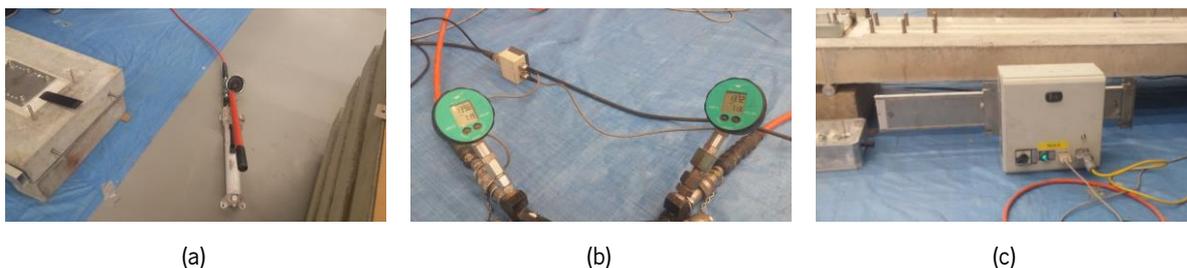


Fig. 3.15 - Instrumentos para aplicação da técnica EBR-GA: (a) macaco hidráulico; (b) manômetros; (c) aquecedor.

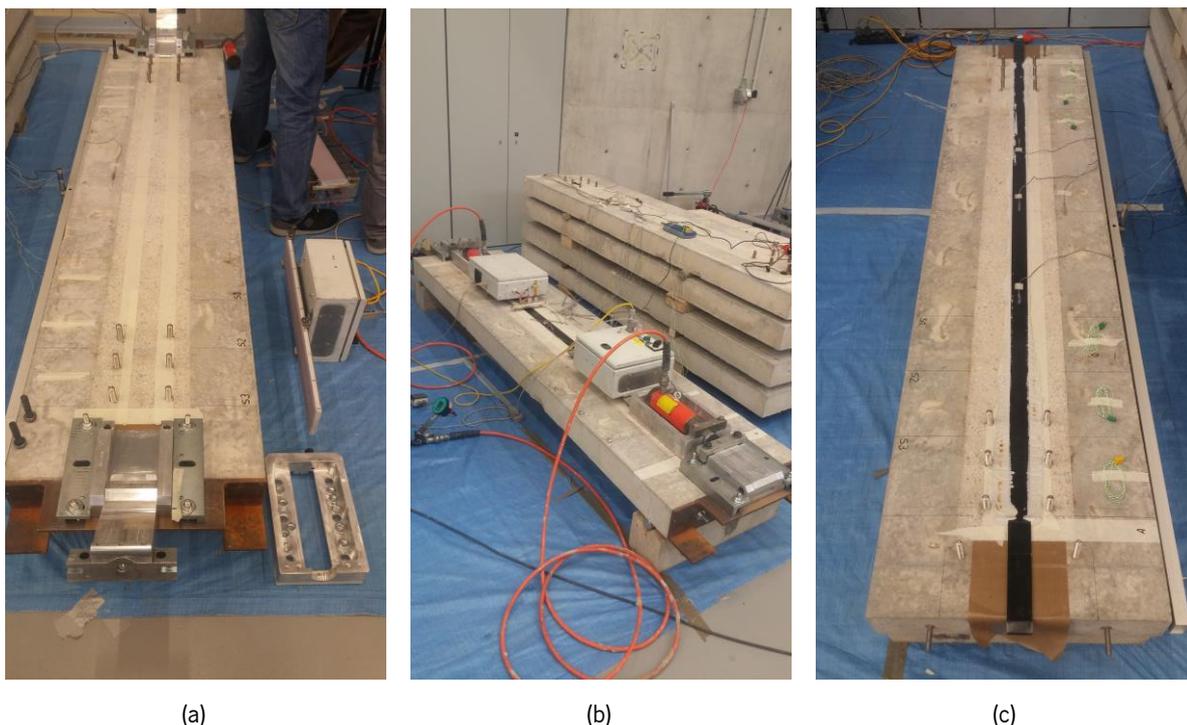


Fig. 3.16 – Processo de reforço da faixa de laje EBR-GA: (a) máscaras; (b) faixa de laje a ser reforçada; (c) faixa de laje reforçada.

As tarefas necessárias à execução do reforço das faixas de laje reforçadas com a técnica EBR-MA, bem como os instrumentos necessários para a aplicação desta técnica (ver ilustrações na Fig. 3.17), são os seguintes (ver ilustrações na Fig. 3.18):

- 1) Limpeza do laminado (com papel e acetona);
- 2) Limpeza da superfície (com ar comprimido);
- 3) Preparação das ancoragens (“Lixamento” da superfície da ancoragem que vai confinar o laminado);
- 4) Mistura do adesivo epóxi;
- 5) Colocação do adesivo epóxi na superfície de betão;
- 6) Colocação do adesivo epóxi no laminado;
- 7) Colocação do laminado na faixa de laje;

- 8) Fecho das garras;
- 9) Colocação de adesivo epóxi na superfície da ancoragem que vai confinar o laminado;
- 10) Colocação das ancoragens;
- 11) Colocação do macaco hidráulico na extremidade do laminado;
- 12) Aplicação do pré-esforço;
- 13) Aperto dos parafusos das ancoragens metálicas;
- 14) Remoção do adesivo epóxi em excesso;
- 15) Remoção das máscaras.



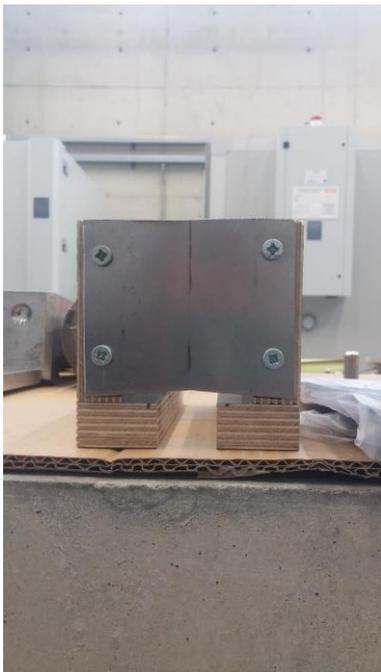
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 3.17 – Instrumentos para a aplicação da técnica EBR_MA: (a) macaco hidráulico; (b) acessórios para aplicação do pré-esforço e ancoragens metálicas; (c) laminado de CFRP instrumentado; (d) e (e) caixa para aplicar o adesivo epóxi no laminado de CFRP; (f) LVDT para controlo da flecha durante a aplicação do pré-esforço.



(a)



(b)



(c)



Fig. 3.18 – Processo de reforço da faixa de laje EBR-MA: (a) máscaras; (b) calha para controle da flecha durante o pré-esforço; (c) apoios da faixa de laje; (d) instrumentação do laminado de CFRP e do betão da faixa de laje; (e) adesivo curado.

As Fig. 3.19 e Fig. 3.20 apresentam a configuração de ensaio utilizada. Trata-se de um sistema de ensaio sob quatro pontos de carga de modo a que a faixa de laje fique sujeita aos esforços pretendidos. Com esta configuração de ensaio, o vão de corte é igual a 900 mm, a distância entre apoios é de 2400 mm e a zona de flexão pura de 600 mm.

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

Para monitorizar os deslocamentos verticais ao longo do eixo longitudinal das faixas de laje, foram instalados cinco transdutores de deslocamento (LVDT1 a LVDT5), como pode ser visualizado na Fig. 3.21. Os LVDT1 e LVDT5 têm um campo de medição de ± 25 mm (precisão de 0.09% F.S.), enquanto que no caso dos LVDT2 a LVDT4, o campo de medida é de ± 75 mm (precisão de 0.08% F.S.). Por sua vez, a força aplicada (F) foi monitorizada através de uma célula de carga com capacidade máxima de 200 kN (precisão de $\pm 0.05\%$ F.S.). Os ensaios foram realizados sob controlo de deslocamento através do LVDT3, tendo sido adotada uma velocidade constante de $20 \mu\text{m/s}$.

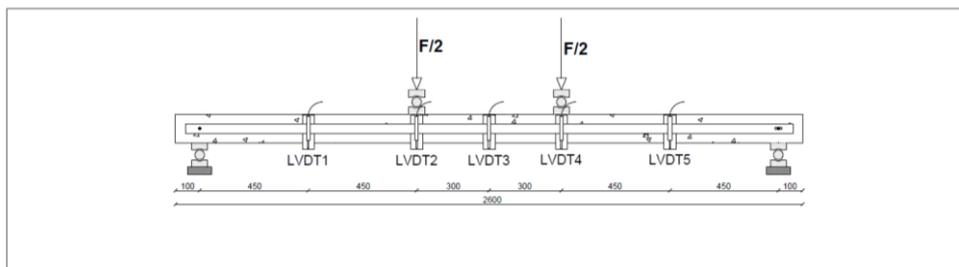


Fig. 3.19 – Configuração dos ensaios (esquema).

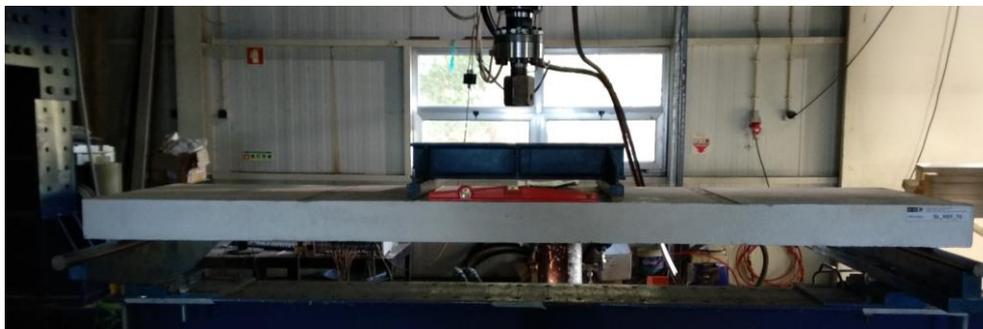


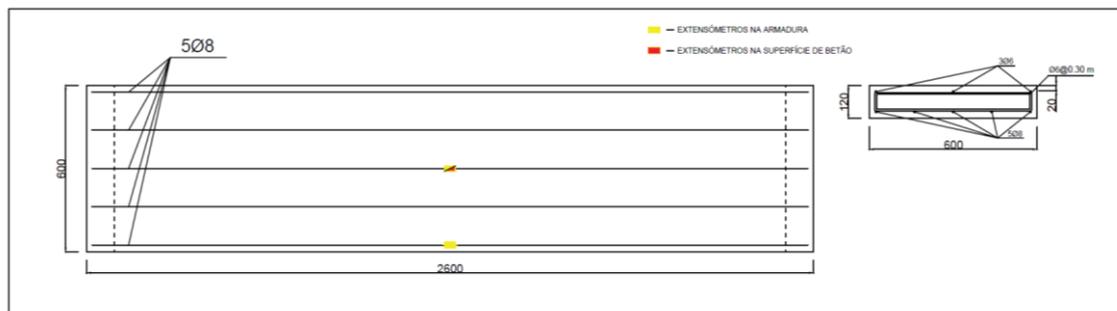
Fig. 3.20 – Configuração dos ensaios.



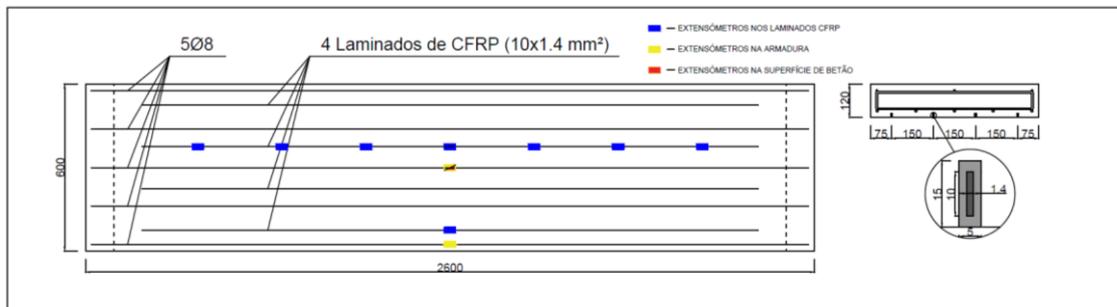
Fig. 3.21 – Instrumentação dos ensaios (LVDT's).

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

Nas medições das extensões nos laminados e na armadura longitudinal usaram-se extensómetros TML BFLA-5-3-3L, enquanto que na medição das extensões no betão foram usados extensómetros TML PFL-30-11-3L. As posições dos extensómetros utilizados na medição das extensões nos laminados de CFRP, na armadura longitudinal inferior e na superfície de betão podem ser visualizadas nas secções longitudinais das faixas de laje ilustradas na Fig. 3.22.

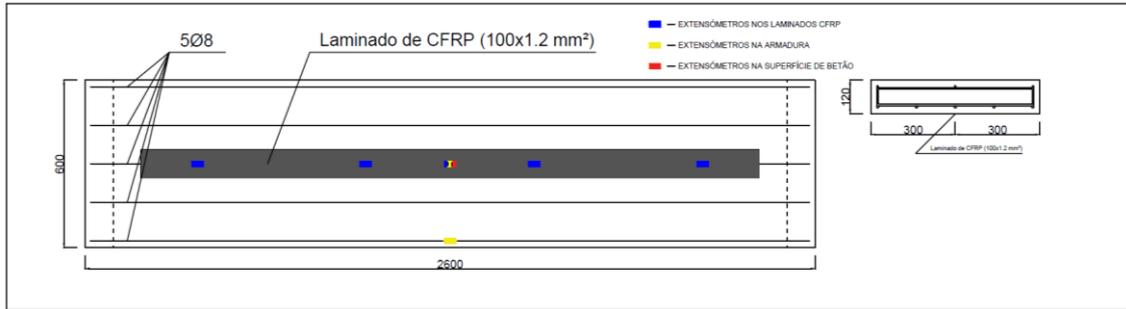


(a)

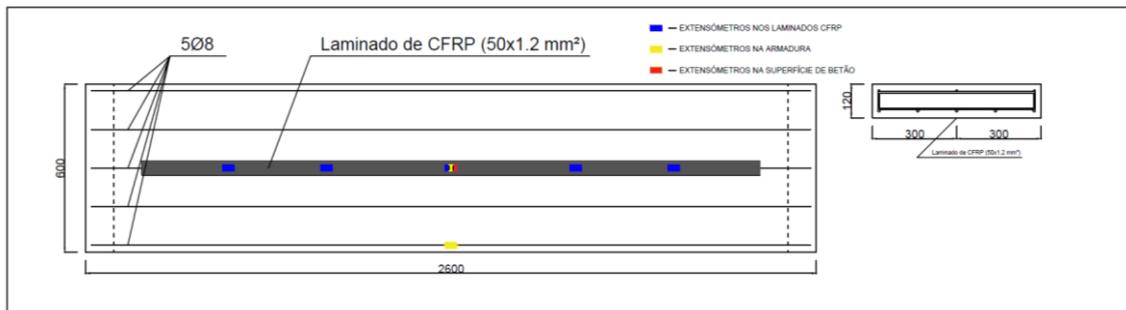


(b)

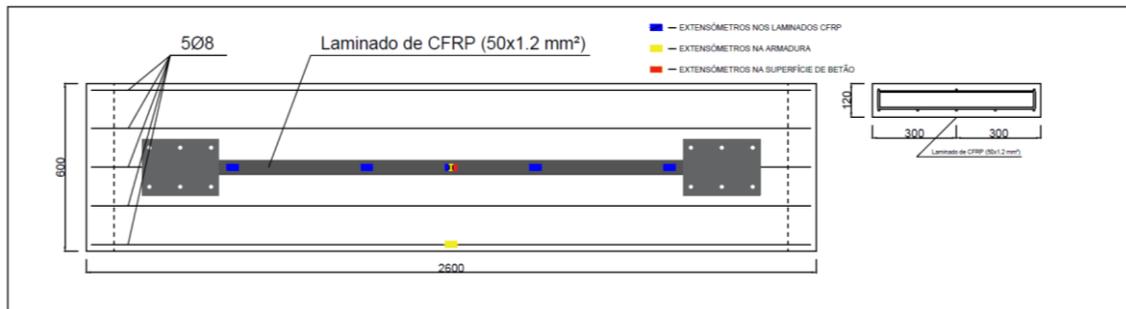
Fig. 3.22 – Secções longitudinais e transversais e extensometria: (a) laje de referência; (b) laje reforçada com a técnica NSM; (c) laje reforçada com a técnica EBR; (d) laje reforçada com a técnica EBR-GA; (e) laje reforçada com a técnica EBR-MA.



(c)



(d)



(e)

Fig. 3.22 (cont.) - Seções longitudinais e transversais e extensometria: (a) laje de referência; (b) laje reforçada com a técnica NSM; (c) laje reforçada com a técnica EBR; (d) laje reforçada com a técnica EBR-GA; (e) laje reforçada com a técnica EBR-MA.

Em todas as faixas de laje foram instalados pelo menos três extensômetros, dois extensômetros para registrar as extensões nos varões de aço central e num de extremidade e um extensômetro para registrar a extensão na superfície de betão comprimida a meio vão. Com todas as faixas de laje instrumentadas nas armaduras longitudinais de tração e nas superfícies de betão mais comprimidas, seguiu-se a instrumentação dos laminados de CFRP. Na faixa de laje de referência (ver Fig. 3.22 (a)), que não foi reforçada, não foram adicionados mais extensômetros do que os supracitados, já nas restantes faixas de laje houve lugar à instrumentação dos laminados de CFRP. Na faixa de laje reforçada com a técnica NSM (ver Fig. 3.22 (b)) foram adicionados um número total de oito extensômetros, sete extensômetros para registrar as extensões ao longo do comprimento de um laminado de CFRP central e

um extensômetro para registrar a extensão a meio de um laminado de CFRP lateral, e nas faixas de laje reforçadas com as técnicas EBR, EBR-GA e EBR-MA (ver Fig. 3.22 (c), (d) e (e)) foram adicionados um número total de cinco extensômetros para registrar as extensões ao longo do comprimento dos respectivos laminados de CFRP.

3.3 Caracterização dos materiais

3.3.1 Betão

Todos os provetes utilizados no contexto do projeto *FRPLongDur*, tanto os provetes prismáticos como as faixas de laje, foram betonados em simultâneo. Aquando da betonagem realizaram-se ensaios de espalhamento com vista a controlar a qualidade do betão utilizado e, adicionalmente, foram betonados cilindros com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura para posterior caracterização mecânica do mesmo, nomeadamente realizando ensaios de compressão. Com os ensaios de compressão realizados de acordo com as normas NP EN 12390-13:2014 e NP EN 12390-3:2011 foi possível obter, respetivamente, os valores médios do módulo de elasticidade (E_{cm}) e de resistência à compressão (f_{cm}).

A betonagem dos provetes foi realizada nas instalações da empresa Tecnipor – Gomes & Taveira Lda. O betão foi fornecido pela empresa Unibetão – Indústrias de betão preparado, S.A. com as seguintes características: classe de resistência C30/37, classe de exposição XC4(P), máxima dimensão dos agregados de 12.5 mm e *slump* S4. Os ensaios de caracterização das propriedades mecânicas à compressão do betão utilizado foram realizados 28 dias após a betonagem. Foram ensaiados 5 provetes cilíndricos de acordo com as normas já referidas. Os resultados em termos médios da resistência à compressão (f_{cm}) e módulo de elasticidade (E_{cm}) são apresentados na Tabela 3.1. Analisando os resultados obtidos, nomeadamente comparando-os com os resultados que a norma (Np En 1992-1-1:2008) prevê, verifica-se que o betão apresentou uma resistência média à compressão (f_{cm}) superior à resistência média à compressão prevista na norma (38 MPa), no entanto apresentou um módulo de elasticidade (E_{cm}) inferior ao que a norma prevê (33 GPa).

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas à compressão do betão ensaiado.

Idade do betão	f_{cm} [MPa]	E_{cm} [GPa]
28 dias	41.49 (4.36%)	29.12 (4.66%)

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

3.3.2 Armadura

Foi utilizado um aço da classe A400 NR SD para materializar as armaduras longitudinais e transversais das faixas de laje. A avaliação das suas características mecânicas foi realizada de acordo com a NP EN ISO 6892-1:2016, onde se recorreu a ensaios de tração uniaxial em controlo de força, com uma velocidade de 700 N/s e 1200 N/s, respetivamente para os varões de diâmetro de 6 mm e de 8 mm. Para cada um dos diâmetros de varão utilizados ($\varnothing 6$ e $\varnothing 8$), foram ensaiados 4 provetes com 600 mm de comprimento. Houve um problema técnico num dos ensaios de caracterização do varão de 6 mm de diâmetro, razão pela qual apenas se apresentam os resultados de três provetes.

São apresentadas, na Fig. 3.23 e na Fig. 3.24, as curvas tensão versus extensão obtidas nos ensaios de caracterização mecânica dos varões de aço dos dois lotes utilizados no reforço das faixas de laje, e na Tabela 3.2 e Tabela 3.3 são apresentados os resultados médios obtidos para o módulo de elasticidade (E_{sm}), tensão de cedência (f_{ym}) e tensão última (f_{um}). Tendo em conta a classe de aço adotada, conclui-se que o aço utilizado apresenta uma resistência maior do que a expectável.

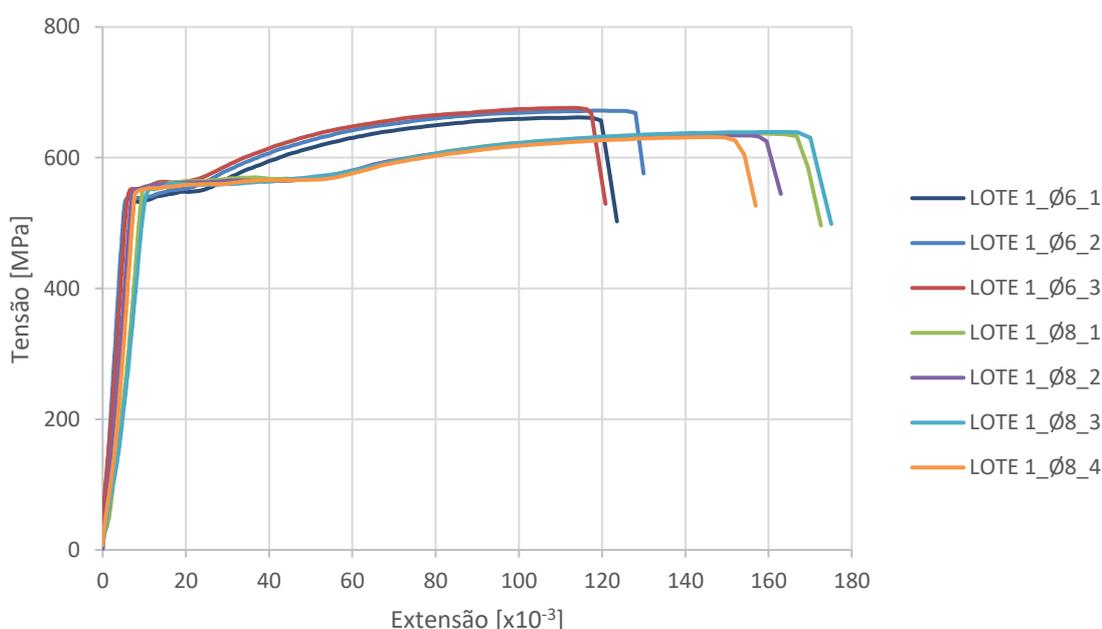


Fig. 3.23 – Curvas tensão *versus* extensão obtidas nos ensaios de caracterização da armadura (LOTE 1).

Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas da armadura utilizada (LOTE 1).

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

Nota: os valores entre parêntesis representam o coeficiente de variação (CoV); este lote foi utilizado nas armaduras das faixas de laje reforçadas com as técnicas EBR, EBR-GA e EBR-MA.

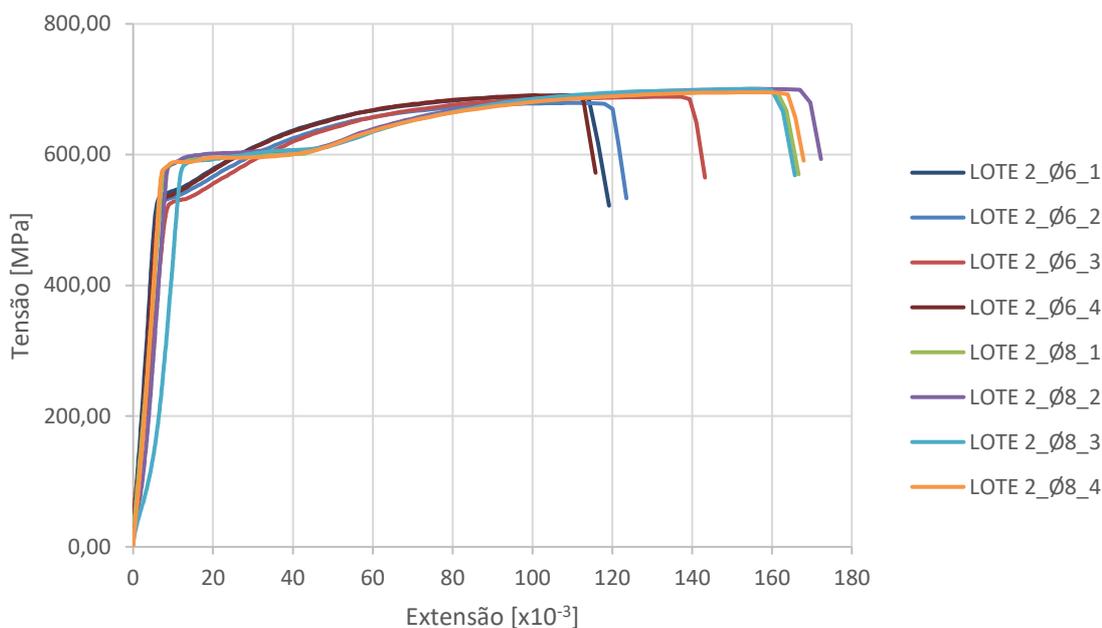


Fig. 3.24 – Curvas tensão versus extensão obtidas nos ensaios de caracterização da armadura (LOTE 2).

Tabela 3.3 – Propriedades mecânicas da armadura utilizada (LOTE 2).

Diâmetro do varão	E_{sm} [GPa]	f_{ym} [MPa]	f_{um} [MPa]
Ø6	241.42 (5.28%)	548.39 (3.63%)	687.14 (0.69%)
Ø8	228.11 (3.22%)	587.28 (3.34%)	698.29 (0.32%)

Nota: os valores entre parêntesis representam o coeficiente de variação (CoV); este lote foi utilizado nas armaduras das faixas de laje reforçadas com a técnica NSM.

3.3.3 Laminados de CFRP

A determinação do módulo de elasticidade (E_i), da resistência à tração (f_i) e da extensão de pico dos laminados de CFRP no presente trabalho foi efetuada de acordo com a ISO 527-5:2009. Foram ensaiadas 6 amostras de laminado de cada tipo de laminados utilizados, com comprimento de 250 mm e diferentes larguras. Os ensaios dos laminados com secção transversal 10x1.4 [mm²] foram realizados utilizando a totalidade das secções transversais, enquanto que os laminados com as secções transversais 50x1.2 [mm²] e 100x1.2 [mm²] foram ensaiados a partir de amostras com 15 mm de largura. Em cada uma das extremidades das amostras de laminado, foram coladas duas peças metálicas para evitar a sua rotura prematura devido a concentrações de tensões introduzidas pelo sistema de ensaio. Os ensaios foram conduzidos em controlo de deslocamento a uma velocidade de 2 mm/min com recurso a um sistema hidráulico servo-controlado (cuja capacidade máxima é de 1000 kN em tração) e a distância adotada entre as garras do sistema foi de 150 mm. Para determinar o módulo de elasticidade, foi instalado um “clip gauge” com um campo de medição de 50 mm na secção central das amostras (ver

Fig. 3.25). Em cada amostra de laminado, foram efetuadas três medições da sua espessura e largura através de um paquímetro digital com precisão de ± 0.01 mm, com a finalidade de serem obtidas as dimensões reais das respetivas secções transversais e ser calculada a tensão longitudinal última. O módulo de elasticidade foi determinado de acordo com a ISO 527-5:2009 sendo obtido pelo declive da reta definida entre as extensões de 0.05% e 0.25% na curva experimental tensão *versus* extensão.

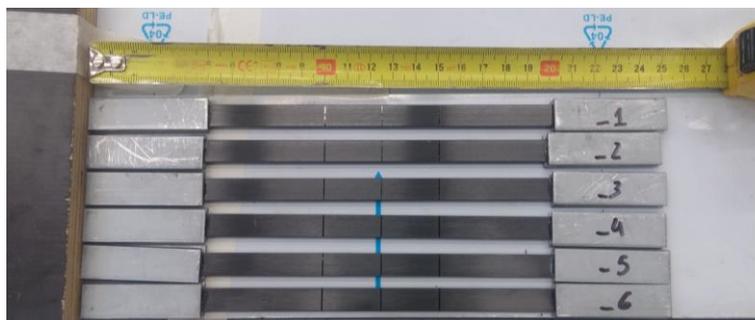


Fig. 3.25 – Grupo de provetes do laminado de CFRP com secção transversal 10x1.4 [mm²] ensaiados (Rolo no. 42).

São apresentadas, na Tabela 3.4, as principais propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de caracterização dos laminados de CFRP.

Tabela 3.4 – Propriedades mecânicas dos laminados de CFRP utilizados.

Secção transversal do laminado (largura x espessura) [mm ²]	Resistência à tração [MPa]	Módulo de elasticidade [GPa]	Extensão última [%]
10x1.4 (Rolo no. 15)	2393.30 (2.01%)	161.88 (1.08%)	1.48 (2.75%)
10x1.4 (Rolo no. 42)	2406.79 (5.11%)	165.25 (1.36%)	1.46 (5.18%)
50x1.2	2743.34 (2.83%)	176.19 (4.33%)	1.56 (4.81%)
100x1.2	2542.96 (5.18%)	196.84 (7.69%)	1.29 (6.64%)

Nota: os valores entre parêntesis representam o coeficiente de variação (CoV); o rolo no. 15 foi utilizado no reforço das faixas de laje NSM, enquanto que o rolo no. 42 foi utilizado no reforço dos provetes prismáticos NSM.

3.3.4 Adesivo Epóxi

O adesivo epóxi, responsável pela ligação entre os laminados de CFRP e o betão, utilizado no reforço dos provetes do projeto *FRPLongDur* foi fornecido pela S&P e tem a designação “*S&P Resin 220 epoxy adhesive®*”. O adesivo é constituído por dois componentes, o componente A e o componente B, que devem ser misturados na proporção de 4:1 até que se obtenha uma mistura homogênea – ver Fig. 3.26.



Fig. 3.26 – Mistura do epóxi S&P Resin 220 epoxy adhesive®. (a) Adesivo epóxi; (b) Mistura dos dois componentes; (c) Componentes misturados.

Segundo a ficha técnica disponibilizada pelo fabricante, após a mistura dos dois componentes e depois de mistura estar curada (3 dias a 20 °C), o adesivo deve possuir as seguintes propriedades mecânicas: (i) módulo de elasticidade em tração superior a 3 MPa, (ii) resistência à compressão superior a 70 MPa e (iii) resistência ao corte superior a 26 MPa. A temperatura recomendada à sua mistura e aplicação está entre +10 °C e +35 °C.

São apresentadas, na Tabela 3.5, as propriedades mecânicas do adesivo epóxi utilizado no reforço dos provetes objeto de estudo nesta dissertação. Os ensaios de tração realizados para determinar as propriedades mecânicas do adesivo epóxi seguiram as recomendações da norma ISO 527-2:2012 – ver Fig. 3.27.

Tabela 3.5 – Propriedades mecânicas do adesivo epóxi utilizado.

Propriedade	S&P Resin 220 epoxy adhesive®
Resistência à tração [MPa]	19.92 (3.02%)
Módulo de elasticidade [GPa]	6.47 (3.04%)
Extensão máxima [%]	0.43 (6.15%)

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



Fig. 3.27 – Setup dos ensaios de tração realizados.

4. RESULTADOS E ANÁLISE

Como já foi referido, o objetivo do projeto *FRPLongDur* é o de avaliar a durabilidade de materiais e técnicas de reforço com recurso a laminados de CFRP (*carbon fiber-reinforced polymer*) e, para isso, concebeu-se uma metodologia que consistiu, resumidamente, em executar cento e oitenta provetes prismáticos reforçados com laminados de CFRP segundo as técnicas NSM (*near-surface mounted*) e EBR (*externally bonded reinforcement*), cujo objetivo último é o de avaliar a durabilidade da ligação entre os laminados de CFRP e a superfície de betão. E consistiu ainda na execução de vinte e oito faixas de laje reforçadas com laminados de CFRP segundo as técnicas NSM, EBR, EBR-MA (*externally bonded reinforcement – mechanical anchorage*) e EBR-GA (*externally bonded reinforcement – gradient anchorage*), com as quais se pretende avaliar a degradação provocada pela exposição ambiental a cada uma das técnicas para que se possa, no final do projeto, ser capaz de produzir recomendações de projeto. Torna-se importante referir que além das faixas de laje supracitadas, que foram reforçadas com laminados de CFRP, foi também executada uma laje sem reforço. A presença desta laje no projeto é importante numa primeira fase, nomeadamente aquando dos ensaios a T0, pois servirá para quantificar a eficiência das diferentes técnicas de reforço avaliadas no projeto. Com os provetes prismáticos e as faixas de laje preparadas para serem colocadas nos diversos ambientes de exposição, o primeiro passo foi ensaiar uma série chamada série T0 de provetes prismáticos e de faixas de laje para se caracterizar o comportamento dos mesmos e assim obter resultados que servirão de referência para o restante projeto. Os resultados e respetiva análise que compõe este capítulo versam sobre a série T0.

Os resultados e análise dos ensaios efetuados no programa experimental realizado no âmbito desta dissertação podem ser divididos em dois grupos, um grupo de ensaios que pretendeu caracterizar o comportamento da ligação entre os laminados de CFRP e o betão, quando utilizadas as técnicas de reforço NSM e EBR, cujos resultados e análise se encontram no Capítulo 4.1, e outro grupo que pretendeu caracterizar o comportamento à flexão de uma faixa de laje sem reforço e das faixas de laje reforçadas com laminados de CFRP segundo as técnicas NSM, EBR, EBR-MA e EBR-GA, cujos resultados e análise se encontram no Capítulo 4.2.

4.1 Ensaios de arranque direto

Neste capítulo são apresentados os resultados e respetiva análise dos ensaios de arranque direto realizados no âmbito desta dissertação, nomeadamente os resultados e respetiva análise dos ensaios de

arranque direto realizados relativos à série T0. Foram ensaiados oito provetes reforçados com laminados de CFRP, quatro segundo a técnica NSM e quatro segundo a técnica EBR. Torna-se importante referir que cada prisma de betão reforçado com a técnica NSM ou com a técnica EBR contém dois provetes de ensaio. Assim, neste programa de ensaios de arranque direto foram utilizados no total quatro prismas de betão reforçados, dois prismas de betão reforçados com a técnica NSM e dois prismas de betão reforçados com a técnica EBR.

Na Tabela 4.1 apresentam-se os resultados obtidos dos vários parâmetros que caracterizam a ligação, quando utilizada a técnica NSM – ver Fig. 4.1. Na referida tabela, $F_{l,max}$, $s_{l,max}$ e $s_{f,max}$ representam, respetivamente, a força de arranque máxima registada, o deslizamento na extremidade carregada e o deslizamento na extremidade livre. Os valores de $s_{l,max}$ e $s_{f,max}$ foram obtidos através dos valores de deslizamento registados pelos dois LVDT's colocados em cada uma das extremidades do comprimento de ancoragem. O parâmetro τ_{max} traduz a tensão tangencial média na interface entre o laminado de CFRP e o adesivo epóxi, sendo esta determinada pela razão entre $F_{l,max}$ e a totalidade da área de superfície ancorada ($b_f \times L_b$). O parâmetro G_f traduz a energia dissipada e é representado pela área sob a curva força de arranque (F) *versus* deslizamento na extremidade carregada (s), até ao valor de 0.3 mm de deslizamento na extremidade carregada (s). O parâmetro f_{fd} indica o valor médio da tensão de tração no laminado quando ocorre a rotura do sistema NSM CFRP e foi determinado pela divisão de $F_{l,max}$ pela área da secção transversal do laminado, A_f . Por fim, o parâmetro f_{fd}/f_{fu} traduz um fator de eficiência da técnica de reforço e foi obtido pelo rácio entre f_{fd} e a tensão de tração última do laminado obtida no ensaio de tração uniaxial, f_{fu} . Os modos de rotura observados nos ensaios estão incluídos na tabela.

Tabela 4.1 – Resultados obtidos nos ensaios de arranque direto dos prismas reforçados com a técnica NSM (valores médios).

Provetes	$F_{l,max}$ [kN]	$s_{l,max}$ [mm]	$s_{f,max}$ [mm]	τ_{max} [MPa]	G_f [kN.mm]	f_{fd} [MPa]	f_{fd}/f_{fu} [%]	MR
BT_NSM_T0_1	27.47	0.59	0.10	20.08	38.34	1962.14	271.17	D
BT_NSM_T0_2	27.55	0.54	0.10	20.14	41.76	1967.86	283.73	D
BT_NSM_T0_3	28.81	0.53	0.13	21.06	45.90	2057.86	330.01	D
BT_NSM_T0_4	28.99	0.51	0.11	21.19	50.73	2070.71	337.88	D
Média	28.21	0.54	0.11	20.62	44.18	2014.64	305.70	-
Desvio Padrão	0.70	0.03	0.01	0.51	4.63	49.89	28.73	-
CoV [%]	2.48	5.69	11.86	2.48	10.48	2.48	9.40	-

Notas: CoV representa o coeficiente de variação; D = Rotura por deslizamento do laminado.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4.1 – Ensaio de arranque direto (NSM): (a) Garra e provete de ensaio; (b) Pórtico; (c) Provete ensaiado; (d) Pormenor do modo de rotura.

Na Tabela 4.1 pode observar-se que todos os ensaios realizados conduziram os provetes ao mesmo modo de rotura, nomeadamente ao escorregamento do laminado na interface laminado – adesivo epóxi. Pode ainda notar-se que os coeficientes de variação são baixos o que indica pouca dispersão de resultados em resultado do cuidado na execução dos provetes, ensaios e homogeneidade dos materiais. Analisando os valores dos parâmetros apresentados na Tabela 4.1 é possível verificar que todos os parâmetros, com a exceção do deslizamento na extremidade livre, têm uma dispersão reduzida. Relativamente à dispersão dos valores dos deslizamentos nas extremidades livres importa dizer que esta

está relacionada com o facto destes deslizamentos serem muito reduzidos e de difícil medição com base no tipo de sensores de deslocamento utilizados, para além da intrínseca variabilidade da ligação.

Na Fig. 4.2 são apresentadas as curvas força de arranque (F_i) *versus* deslizamento na extremidade carregada (s), obtidas nos ensaios de arranque direto dos quatro provetes reforçados com a técnica NSM.

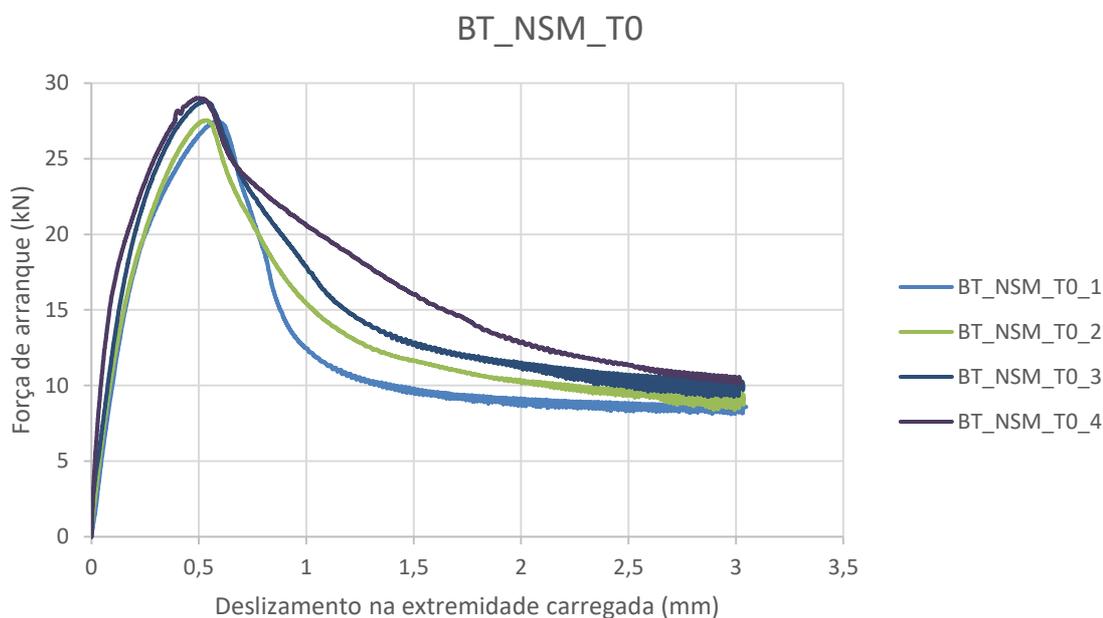


Fig. 4.2 – Curvas força de arranque *versus* deslizamento na extremidade carregada dos primas reforçados com a técnica NSM.

Torna-se importante destacar, observando as curvas apresentadas, que os provetes ensaiados apresentaram respostas semelhantes, reforçando a boa execução dos mesmos.

As curvas apresentadas podem ser divididas em dois ramos. No primeiro ramo os provetes apresentaram uma resposta próxima da linear. Este primeiro ramo ocorre desde o início do ensaio até que se atinga uma força, cerca de 40% a 50% da força de pico. A partir desta fase o comportamento é não linear (relação força de arranque - deslizamento) até à força de pico, devido ao forte comportamento não linear do adesivo epoxídico. A partir da força de pico nota-se uma queda abrupta da força com o aumento do deslizamento do laminado. Em estudos realizados pela comunidade científica nesta área de estudo, respostas semelhantes às apresentadas na Fig. 4.2 têm sido obtidas, como no caso dos ensaios experimentais realizados por (Cruz, 2016).

Na Tabela 4.2 apresentam-se os resultados obtidos dos vários parâmetros que caracterizam a ligação do laminado de CFRP e a superfície de betão, quando utilizada a técnica EBR – ver Fig. 4.3.

Tabela 4.2 - Resultados obtidos nos ensaios de arranque direto dos prismas reforçados com a técnica EBR (valores médios).

Provetes	F_{l,max} [kN]	s_{l,max} [mm]	τ_{max} [MPa]	G_f [kN.mm]	f_{f^a} [MPa]	f_{f^a}/f_{f^u} [%]	MR
BT_EBR_TO_1	34.06	0.65	3.10	7.52	567.67	100	D+C
BT_EBR_TO_2	25.47	0.43	2.32	6.06	424.50	115.46	C
BT_EBR_TO_3	33.62	0.55	3.06	7.47	560.33	100.99	D+C
BT_EBR_TO_4	28.92	0.50	2.63	6.27	482.00	116.43	C
Média	30.52	0.53	2.77	6.83	508.63	108.22	-
Desvio Padrão	3.54	0.08	0.32	0.67	59.05	7.74	-
CoV [%]	11.61	15.13	11.61	9.80	11.61	7.15	-

Notas: CoV representa o coeficiente de variação; D = Rotura na interface adesivo-laminado; C = Rotura por coesividade no betão.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4.3 - Ensaio de arranque direto (EBR): (a) Configuração do ensaio; (b) Configuração do ensaio; (c) Instrumentação; (d) Provete depois de ensaiado.

Analisado e comparando o valor dos parâmetros apresentados na Tabela 4.2 com os valores apresentados na Tabela 4.1, é possível verificar que os valores de $F_{l,max}$ e $s_{l,max}$ apresentam, no caso dos ensaios de arranque direto dos provetes reforçados com a técnica EBR, uma maior dispersão. Esta diferença entre as dispersões dos resultados obtidos pode ser explicada, em certa medida, pela variabilidade em assegurar homogeneidade no protocolo adotado para o tratamento de superfície

realizado nos provetes reforçados com a técnica EBR e, sobretudo, na variabilidade inerente ao mecanismo resistente com esta técnica no qual resulta uma rotura coesiva no betão.

Na Fig. 4.4 são apresentadas as curvas em termos de força de arranque (F) *versus* deslizamento da extremidade carregada (s), obtidas nos ensaios de arranque direto dos provetes reforçados com a técnica EBR.

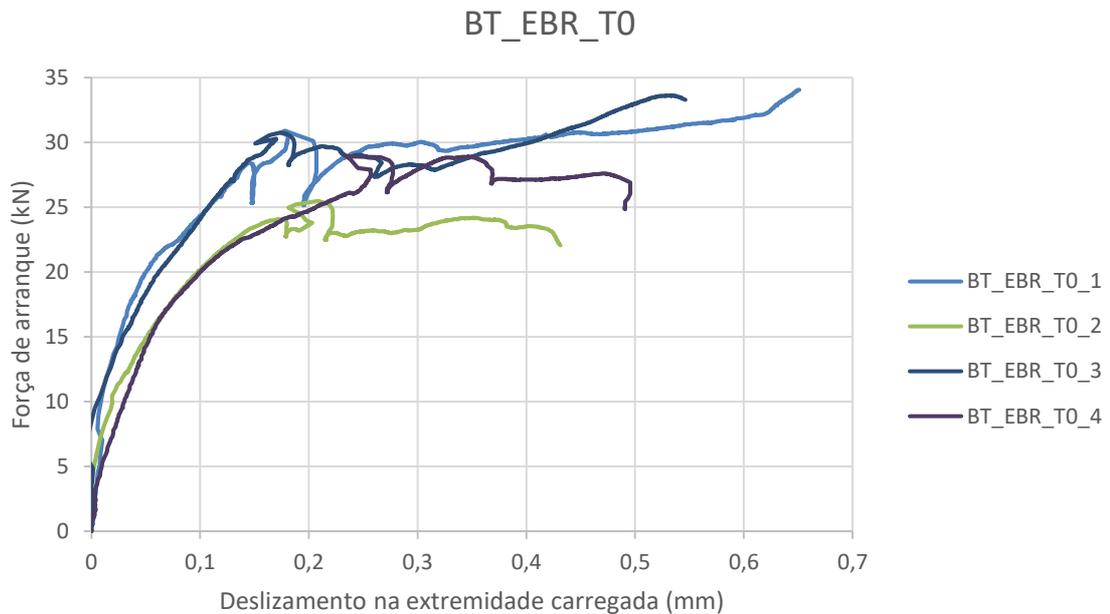


Fig. 4.4 - Curvas força de arranque *versus* deslizamento na extremidade carregada dos primas reforçados com a técnica EBR.

Importa, desde logo, salientar, observando as curvas apresentadas, que os provetes ensaiados apresentaram comportamento global semelhante.

Em termos gerais, é possível identificar dois comportamentos experimentais distintos em cada uma das curvas apresentadas. O primeiro ramo aproxima-se da resposta linear, sem que sejam notadas quaisquer quedas ou aumentos abruptos da força de arranque aplicada. Esta fase ocorre desde o início do ensaio até que a força atinja aproximadamente 70% a 80% da máxima força de arranque monitorizada. A partir deste valor de força, começa a notar-se uma maior degradação da rigidez devido ao início do processo de destacamento do reforço. Este processo inicia-se quando a resistência ao corte máxima é atingida no início do comprimento de ancoragem, isto é, na extremidade carregada. Regra geral, durante este processo, verifica-se um aumento do deslizamento na extremidade carregada para valores de carga aplicada aproximadamente constantes. Contudo, em alguns casos, após o início deste processo, a força aplicada continua a aumentar, embora de forma menos acentuada, o que pode ser justificado por possíveis irregularidades geométricas dos prismas de betão ou, mais provavelmente, devido ao facto da

camada de betão, que após a rotura do sistema fica ligada ao laminado, atravessar um agregado mais grosso, o que significa que para aumentar o deslizamento seja requerida uma força de corte aplicada mais elevada (através ao nível da interface formada). Em estudos realizados pela comunidade científica nesta área de estudo, respostas semelhantes às apresentadas na Fig. 4.4 têm sido obtidas, como no caso dos ensaios experimentais realizados por Soares (2017).

4.2 Ensaios de flexão

Na Tabela 4.3 apresenta-se a síntese dos principais resultados obtidos nos ensaios à flexão das faixas de laje – ver Fig. 4.5. Os parâmetros K_I , K_{II} e K_{III} representam, respetivamente, a rigidez à flexão nas três fases que constituem a resposta típica deste tipo de elementos estruturais de betão armado reforçados com laminados de CFRP: (i) fase elástica, (ii) fase fendilhada e (iii) fase pós-cedência da armadura longitudinal. Por sua vez, os parâmetros F_{cr} , F_y e F_{max} , representam, respetivamente, a força no início da fendilhação, na plastificação das armaduras e a carga máxima registada, sendo δ_{cr} , δ_y e δ_{max} os respetivos deslocamentos verticais medidos a meio vão da faixa de laje. O parâmetro ϵ_{max} representa a extensão registada no laminado de CFRP quando atingida a força máxima, F_{max} , enquanto que o parâmetro δ_{max}/δ_y traduz a ductilidade da resposta de cada uma das faixas de laje reforçadas, expresso através da razão entre os deslocamentos registados a meio vão relativos às forças F_{max} e F_y . A última coluna da tabela indica o modo de rotura (MR) ocorrido em cada uma das faixas de laje.

Tabela 4.3 – Resultados obtidos nos ensaios à flexão das faixas de laje.

Faixa de Laje	Rigidez à flexão			Início da fendilhação		Plastificação das armaduras		Carga máxima		Parâmetros de ductilidade		MR
	K	K_I	K_{II}	F_{cr}	δ_{cr}	F_y	δ_y	F_{max}	δ_{max}	ϵ_{max}	δ_{max}/δ_y	
	[kN/mm]			[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[x10 ⁻²]	[-]	
SL_REF_TO	7.51	1.30	-	12.30	1.17	28.82	19.58	30.96 ⁽¹⁾	120.47 ⁽¹⁾	-	-	-
SL_NSM_TO	9.14	1.35	0.44	14.44	2.41	39.94	22.28	62.28	74.44	14.09	3.34	F
SL_EBR_TO	10.82	1.87	0.98	12.63	1.32	53.22	24.64	66.47	41.23	6.65	1.67	D
SL_EBR_MA_TO	10.59	1.57	0.55	20.41	2.04	49.69	22.19	67.62	79.24	12.24	3.57	F
SL_EBR_GA_TO	9.95	1.56	0.55	20.01	2.00	52.04	23.26	59.98	38.27	7.00	1.65	D

Notas: F – Rotura por tração do laminado de CFRP; D – Rotura por destacamento do sistema de reforço;

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

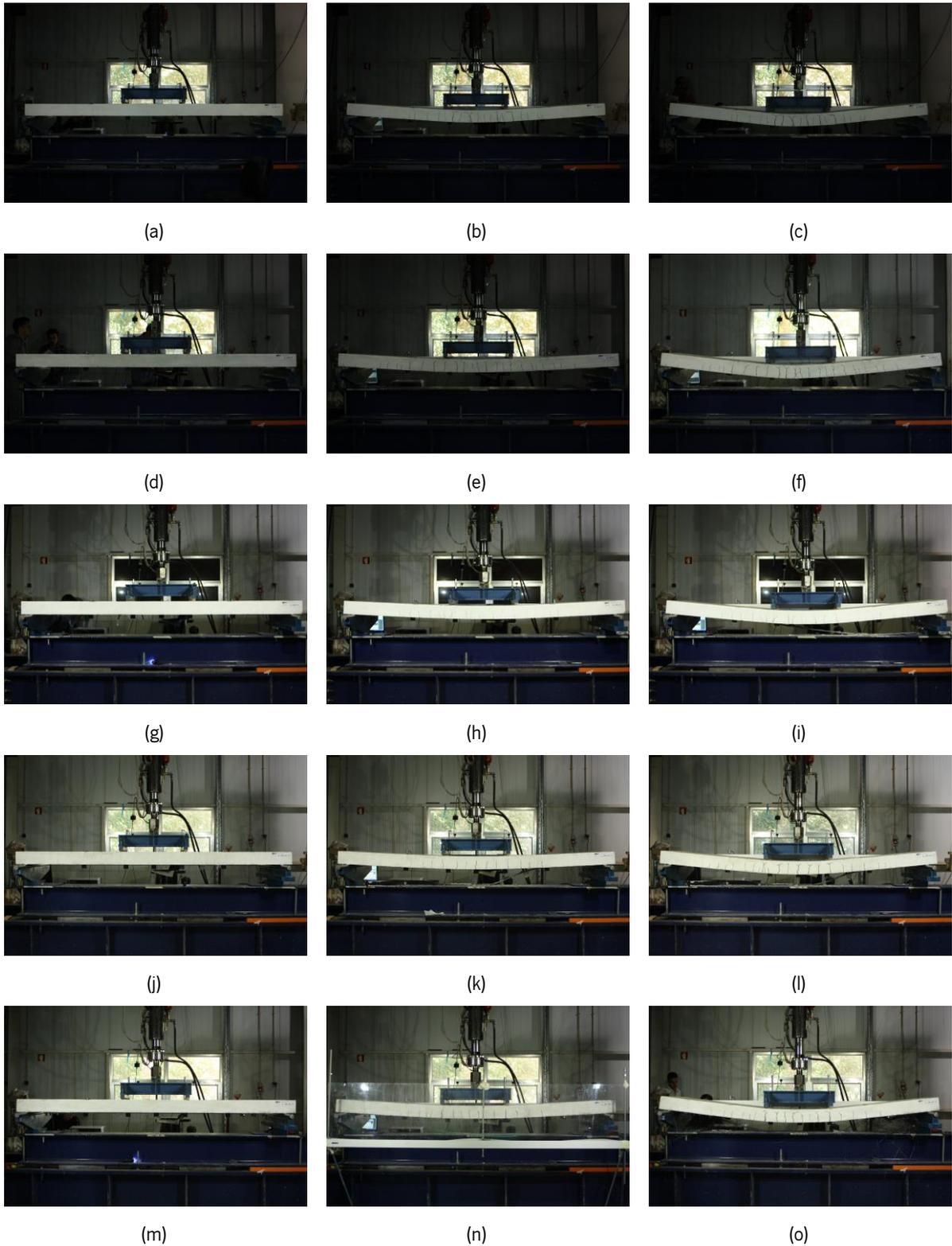


Fig. 4.5 – Ensaio à flexão realizados: (a) SL_REF_TO (início); (b) SL_REF_TO (meio); (c) SL_REF_TO (fim); (d) SL_NSM_TO (início); (e) SL_NSM_TO (meio); (f) SL_NSM_TO (fim); (g) SL_EBR_TO (início); (h) SL_EBR_TO (meio); (i) SL_EBR_TO (fim); (j) SL_EBR_GA_TO (início); (k) SL_EBR_GA_TO (meio); (l) SL_EBR_GA_TO (fim); (m) SL_EBR_MA_TO (início); (n) SL_EBR_MA_TO (meio); (o) SL_EBR_MA_TO (fim).

Na Fig. 4.6, encontram-se representadas as curvas força aplicada *versus* deslocamento a meio vão obtidas nos ensaios à flexão das faixas de laje. Nas curvas representadas é possível observar o

comportamento típico de elementos de betão armado reforçados à flexão com laminados de CFRP. E, independentemente das técnicas de reforço utilizadas nas faixas de laje reforçadas, nota-se que o comportamento à flexão destas, tanto em serviço como na rotura, em relação à faixa de laje de referência (sem reforço) apresenta maiores valores de rigidez em estado fissurado, maior carga de cedência e de rotura, como esperado.

Complementarmente, na Fig. 4.7, apresenta-se a evolução dos deslocamentos verticais experimentados por cada uma das faixas de laje (deformada) ao longo dos respetivos ensaios, para vários níveis de carregamento que compreendem todas as fases da sua resposta estrutural (desde o início do ensaio até à carga máxima registada). Os deslocamentos verticais foram registados recorrendo a cinco transdutores de deslocamento (LVDT1 a LVDT5) que foram instalados num elemento acessório (numa calha) utilizado em todos os ensaios, que permitiu monitorizar os deslocamentos ao longo do eixo longitudinal de cada uma das faixas de laje, tal como foi descrito no Capítulo 3.

Com a análise da Fig. 4.7 é perceptível o melhor comportamento apresentado pelas faixas de laje reforçadas com as técnicas NSM e EBR-MA relativamente às faixas de laje reforçadas com as técnicas EBR e EBR-GA. Quando é atingida a carga máxima, isto é, no instante em que ocorre a rotura do sistema de reforço, a média dos deslocamentos verticais registados a meio vão das faixas de laje reforçadas com as técnicas NSM e EBR-MA foi 76.84 mm, enquanto que a média dos deslocamentos verticais registados a meio vão das faixas de laje reforçadas com as técnicas EBR e EBR-GA foi 39.75 mm, que corresponde a uma diminuição do deslocamento médio de 48.26%, o que revela o comportamento mais dúctil e maior eficiência das técnicas de reforço NSM e EBR-MA, em virtude da rotura prematura dos sistemas de reforço das duas primeiras técnicas.

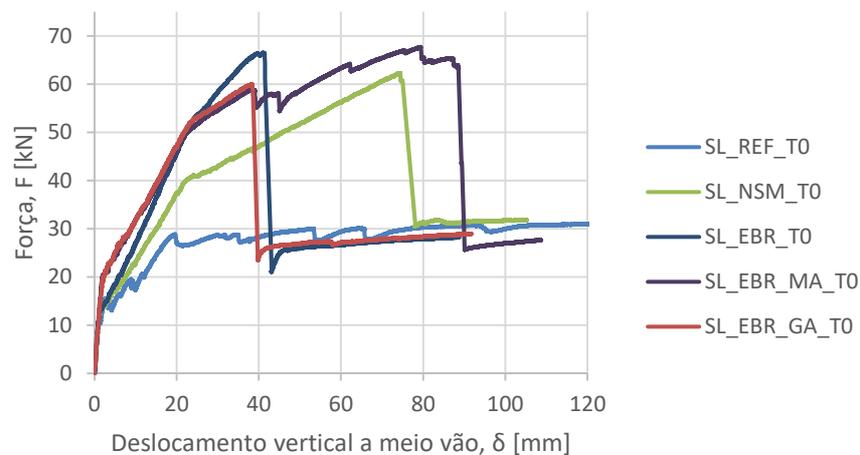
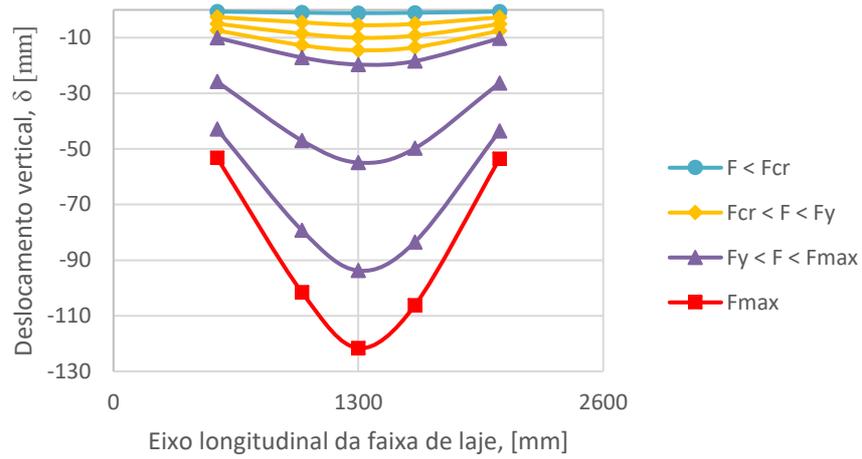
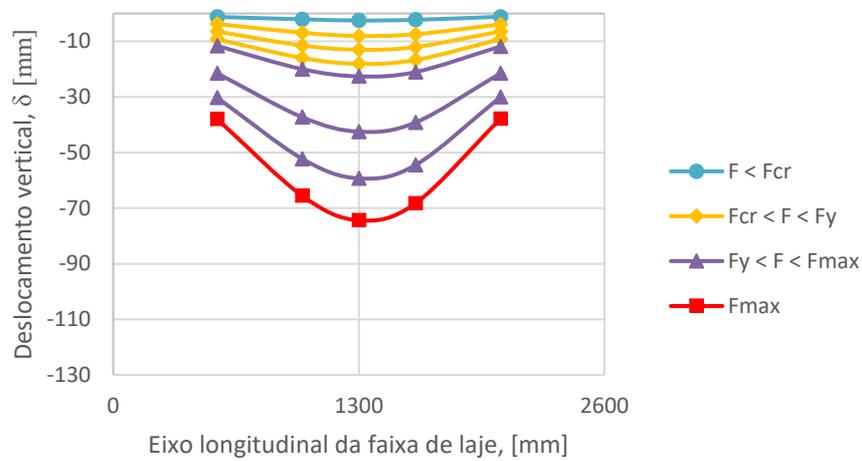


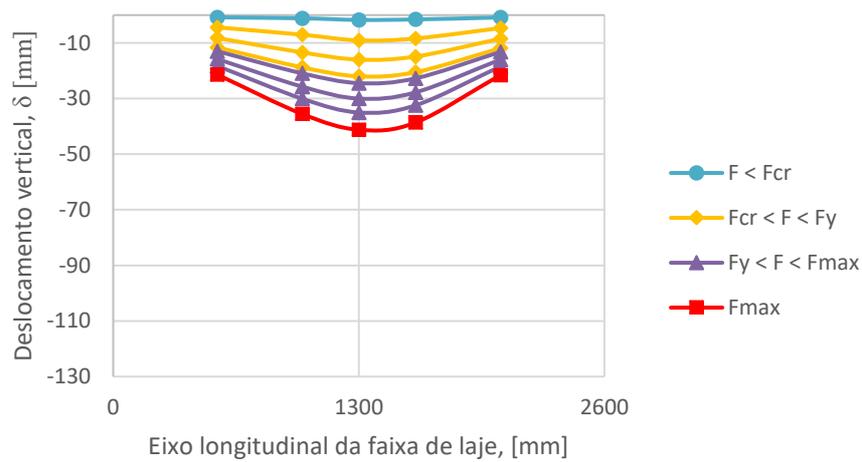
Fig. 4.6 – Curva força *versus* deslocamento vertical a meio vão das faixas de laje.



(a)

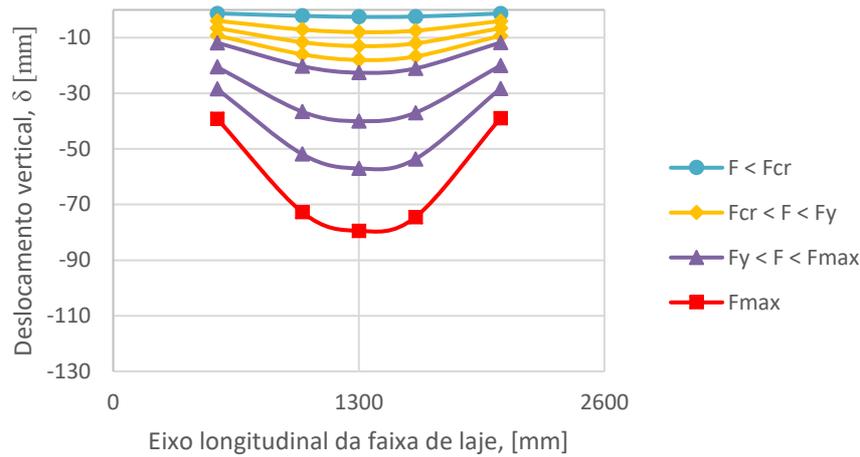


(b)

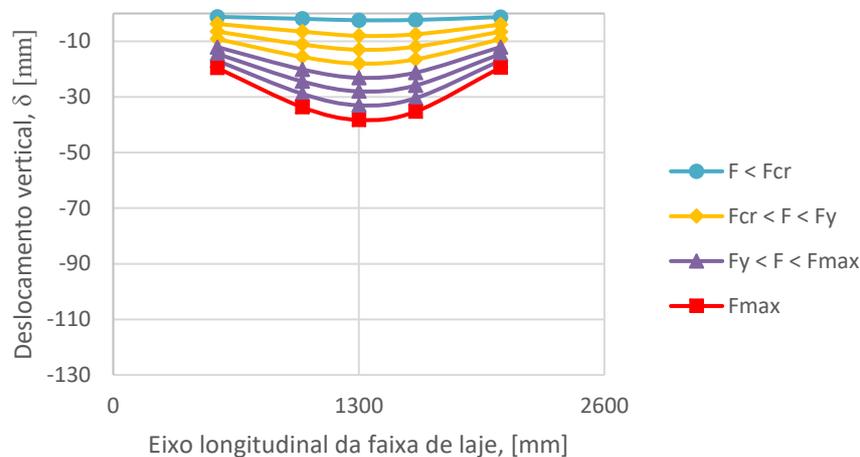


(c)

Fig. 4.7 – Deslocamentos verticais experimentados pela faixa de laje de referência (SL_REF_T0) (a) e pelas faixas de laje reforçadas com as técnicas NSM (SL_NSM_T0) (b), EBR (SL_EBR_T0) (c), EBR-MA (SL_EBR_MA_T0) (d) e EBR-GA (SL_EBR_GA_T0) (e), para vários níveis de carregamento, até à carga máxima registada (F_{max}).



(d)



(e)

Fig. 4.7 (cont.) – Deslocamentos verticais experimentados pela faixa de laje de referência (SL_REF_T0) (a) e pelas faixas de laje reforçadas com as técnicas NSM (SL_NSM_T0) (b), EBR (SL_EBR_T0) (c), EBR-MA (SL_EBR_MA_T0) (d) e EBR-GA (SL_EBR_GA_T0) (e), para vários níveis de carregamento, até à carga máxima registada (F_{max}).

Analisando as respostas das faixas de laje reforçadas com laminados de CFRP apresentadas (ver Fig. 4.6), todas estas apresentam as três fases de comportamento já mencionadas anteriormente: (i) fase I, correspondente à fase de comportamento elástico, desde o início do ensaio até ao instante de abertura das primeiras fendas nas secções onde o betão atinge a respetiva resistência à tração. Nesta fase, todos os materiais que constituem o elemento estrutural (betão, aço e CFRP) contribuem para a rigidez elástica de flexão (K); (ii) fase II, correspondente à fase fendilhada, desde o instante em que se inicia a fendilhação até à cedência das armaduras longitudinais de tração. Nesta fase existe uma contínua formação de fendas no betão tracionado até à sua estabilização. Por conseguinte, o betão em tração vai deixando de contribuir para a rigidez do sistema (K_n) enquanto que a profundidade do eixo neutro vai diminuindo; (iii) fase III, correspondente à fase de pós-cedência da armadura longitudinal até ser

registada a carga máxima. Nesta fase a armadura longitudinal de tração deixa de contribuir para a rigidez K_{III} e a capacidade de carga crescente é essencialmente assegurada pelo laminado em tração e pelo betão em compressão.

A transição entre as diferentes fases de comportamento dá-se devido à diminuição da rigidez global de flexão gerada pela perda de eficiência dos materiais envolvidos, mais concretamente o betão tracionado (abertura de fendas) e a plastificação das armaduras longitudinais, respetivamente na transição entre a fase I e II e entre a fase II e III. A fase III termina com a rotura dos laminados de CFRP, tendo esta ocorrido quando a totalidade da capacidade resistente dos laminados foi esgotada nas faixas de laje reforçadas com as técnicas NSM e EBR-MA, e quando a resistência ao destacamento da interface betão/CFRP foi atingida nas faixas de laje reforçadas com as técnicas EBR e EBR-GA. A partir do instante em que ocorre a rotura do sistema de reforço, as lajes reforçadas passam a ter um comportamento muito próximo do observado na laje de referência, tal como esperado.

Na faixa de laje reforçada com a técnica NSM, a rotura dos laminados de CFRP aparenta ter ocorrido em simultâneo. Esta dedução encontra justificação na ausência de patamares, entre a força máxima registada e a força residual, na curva apresentada na Fig. 4.6.

Relativamente à laje de referência, devido à inexistência de laminado de CFRP, apenas apresenta as duas primeiras fases de comportamento. Nesta, após a plastificação das armaduras longitudinais de tração e devido ao seu comportamento dúctil, apenas se verifica um aumento de deformação a meio vão para uma carga aproximadamente constante (o valor de F_{max} registado é apenas 7.42% superior a F_y , devido ao fenómeno de endurecimento do aço).

As diferenças entre os dois sistemas de ancoragem estudados nas faixas de laje pré-esforçadas EBR-GA e EBR-MA, são evidentes quando se observam os respetivos modos de rotura. O modo de rotura observado no ensaio à flexão da faixa de laje EBR-MA foi a rotura do laminado de CFRP. Este resultado não surpreende uma vez que o facto da faixa de laje ter as extremidades do laminado de CFRP ancoradas mecanicamente, garante que, no caso de não ser atingida a tensão de rotura do betão à compressão, a capacidade resistente do laminado é esgotada. Relativamente à faixa de laje reforçada com a técnica EBR-GA, o modo de rotura observado foi o destacamento do sistema de reforço. Este resultado indica que o sistema de ancoragem empregue nesta técnica, apesar de ter apresentado um bom comportamento até que tivesse sido atingida a força máxima registada, não foi capaz de aproveitar toda a capacidade mecânica do laminado. Assim, conclui-se que o sistema de ancoragem da faixa de laje EBR-MA apresenta um comportamento superior quando comparado com o sistema de ancoragem da faixa de laje EBR-GA.

Relativamente ao pré-esforço dos laminados importa observar que este retardou a fissuração das faixas de laje. A média de valores das forças registadas aquando da abertura da primeira fenda, no caso das faixas de laje pré-esforçadas, foram muito superiores, cerca de 49.32%, quando comparada com a média de valores das forças registadas nos ensaios experimentais das faixas de laje não pré-esforçadas, revelando o superior comportamento em serviço que o pré-esforço dos laminados permite obter.

5. SIMULAÇÕES ANALÍTICAS

5.1 Ensaios de arranque direto

Os ensaios de arranque direto experimentais foram, no caso da técnica NSM (*near-surface mounted*), simulados recorrendo às normas ACI 440.2R-08 e SA HB 305-2008, enquanto que no caso da técnica EBR (*externally bounded reinforcement*) se recorreu à norma CNR-DT 200 R1/2013.

5.1.1 Técnica NSM

Segundo a formulação da norma ACI 440.2R-08 a força de arranque máxima é dada pela equação (5.1), onde L_b representa o comprimento de ancoragem do FRP (*fiber-reinforced polymer*), A_f é a área da secção transversal do FRP, f_{fd} é a resistência à tração de cálculo do FRP e L_d é o comprimento para o qual toda a capacidade resistente do FRP é mobilizada e pode ser calculado através da equação (5.2), onde τ_{avg} (5.3) é um valor fixo e representa a tensão de aderência média e p_f é o perímetro da secção transversal do FRP. Na Tabela 5.1 é possível ver os valores que foram utilizados no cálculo da força de arranque máxima.

$$F_{max} = \begin{cases} A_f f_{fd} & \text{se } L_b \geq L_d \\ A_f f_{fd} \frac{L_b}{L_d} & \text{se } L_b < L_d \end{cases} \quad (5.1)$$

$$L_d = \frac{A_f f_{fd}}{p_f \tau_{avg}} \quad (5.2)$$

$$\tau_{avg} = 6.9 \text{ MPa} \quad (5.3)$$

Tabela 5.1 – Valores dos parâmetros utilizados no cálculo da força de arranque máxima através da norma ACI 440.2R-08.

Parâmetros	Valores utilizados no cálculo
A_f [mm ²]	14
f_{fd} [MPa]	2406.79 (ver Tabela 3.4)
p_f [mm]	22.8
L_b [mm]	60

Assim, aplicando a equação (5.1), a força de arranque máxima segundo a norma ACI 440.2R-08 é igual a 9.44 kN, bem abaixo da média obtida experimentalmente que foi de 28.21 kN.

De acordo com a norma SA HB 305-2008, a força de arranque máxima pode ser calculada através da equação (5.4), onde L_d é o comprimento para o qual toda a capacidade resistente do FRP é mobilizada e pode ser calculado através da equação (5.5), τ_{max} é a tensão de corte máxima e pode ser calculada recorrendo à expressão (5.6), δ_{max} e φ_{per} são parâmetros que podem ser calculados recorrendo às expressões (5.7) e (5.8), respetivamente, L_{per} é o perímetro da superfície de rotura (afastado 1 mm do perímetro do entalhe) e pode ser calculado através da equação (5.9), E_f é o módulo de elasticidade do laminado, A_f é a área da secção transversal do laminado, f_{fd} é a resistência à tração de cálculo do FRP, f_c é a resistência à compressão do betão, L_b é o comprimento de ancoragem do FRP, d_g e b_g são, respetivamente, a profundidade e largura do entalhe. Na Tabela 5.2 é possível ver os valores que foram utilizados no cálculo da força de arranque máxima.

$$F_{max} = \begin{cases} \sqrt{\tau_{max}\delta_{max}}\sqrt{L_{per}(EA)_f} \leq A_f f_{fd} & \text{se } L_b \geq L_d \\ \sqrt{\tau_{max}\delta_{max}}\sqrt{L_{per}(EA)_f} \frac{L_b}{L_d} \leq A_f f_{fd} & \text{se } L_b < L_d \end{cases} \quad (5.4)$$

$$L_d = \frac{\pi}{2 \sqrt{\frac{\tau_{max} L_{per}}{\delta_{max}(EA)_f}}} \quad (5.5)$$

$$\tau_{max} = (0.8 + 0.078\varphi_{per})f_c^{0.6} \quad (5.6)$$

$$\delta_{max} = (0.73\varphi_{per}^{0.5} f_c^{0.67})f_c^{0.6} / \tau_{max} \quad (5.7)$$

$$\varphi_{per} = (d_g + 1) / (b_g + 2) \quad (5.8)$$

$$L_{per} = 2(d_g + 1) + b_g + 2 \quad (5.9)$$

Tabela 5.2 – Valores dos parâmetros utilizados no cálculo da força de arranque máxima através da norma SA HB 305-2008.

Parâmetros	Valores utilizados no cálculo
A_f [mm ²]	14
f_{fd} [MPa]	2406.79 (ver Tabela 3.4)
E_f [GPa]	165.25 (ver Tabela 3.4)
f_c [MPa]	41.49 (ver Tabela 3.1)
d_g [mm]	15
b_g [mm]	5

Assim, constata-se que a previsão da força de arranque máxima dada pela norma SA HB 305-2008 é igual a 13.62 kN, que é um valor mais baixo do que o valor médio obtido nos ensaios experimentais que foi de 28.21 kN.

Conclui-se, assim, que ambas as normas utilizadas na simulação analítica subestimam a força de arranque máxima. Porém, comparando ambas as previsões, constata-se que a norma SA HB 305-2008 oferece uma melhor previsão da força de arranque máxima. De facto, comparando o valor médio da força de arranque obtido experimentalmente com as previsões da força de arranque utilizando ambas as normas, chega-se à conclusão de que a norma ACI 440.2R-08 e a norma SA HB 305-2008 preveem que a força de arranque máxima é, respetivamente, 33.46% e 48.30% do valor médio obtido experimentalmente. As diferenças encontradas entre a média dos valores obtidos experimentalmente e os valores calculadas através das normas, são devidas à calibração das formulações sugeridas pelas normas, nomeadamente, no caso da norma ACI 440.2R-08, esta sugere uma tensão de aderência média, τ_{avg} , igual a 6.9 MPa, que está muito afastada da média das tensões de aderência médias obtidas experimentalmente que foi de 20.62 MPa (ver Tabela 4.1). O valor de tensão de aderência média sugerido pela norma foi obtido a partir da análise de ensaios de arranque direto e trata-se de um valor que produz, como seria de esperar, valores de forças de arranque máximas conservativos, pois trata-se de uma norma para ser utilizada em contexto de projeto. Já no caso da norma SA HB 305-2008, a calibração tem origem nos coeficientes presentes nas equações (5.6) e (5.7) sugeridas para o cálculo da tensão de aderência máxima, τ_{max} , e para o cálculo de δ_{max} , respetivamente. (Coelho *et al.*, 2016)

5.1.2 Técnica EBR

Segundo as previsões da norma CNR-DT 200 R1/2013 para o cálculo da força de arranque máxima dos provetes reforçados com a técnica EBR, aplicando a equação (5.10) para o caso dos ensaios realizados no presente trabalho, o comprimento ótimo de ancoragem (l_e), a partir do qual o aumento de l_b não se traduz num aumento de resistência da ligação, é de 200 mm.

$$l_e = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_b} \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fm}}{2}}, 200 \text{ mm} \right\} \quad (5.10)$$

Apesar do reconhecimento da importância da utilização de um método de preparação da superfície que proporcione um adequado nível de rugosidade, este não é considerado na norma em apreço CNR-DT 200 R1/2013. De facto, na formulação proposta para a previsão da força de arranque máxima (F_{max}), nenhum dos parâmetros tem em conta o nível de rugosidade apresentado pela superfície. O cálculo da força de arranque máxima, F_{max} , foi realizado através da equação (5.11), onde b_f é a largura do laminado de CFRP, E_f é o módulo de elasticidade do laminado, t_f é espessura do laminado e Γ_{Fm} é o valor da energia de fratura específica média. O valor da energia de fratura específica média, Γ_{Fm} , foi obtido a partir da equação (5.12), nesta k_G é um coeficiente que depende da natureza do reforço

aplicado, k_b é um coeficiente geométrico que pode ser, por sua vez, obtido a partir da equação (5.13), onde b é a largura do provete ensaiado e f_{cm} e f_{ctm} são, respetivamente, a resistência média à compressão e a resistência média à tração do betão. Na Tabela 5.3 apresentam-se os valores utilizados no cálculo.

$$F_{max} = b_f \sqrt{2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fm}} \quad (5.11)$$

$$\Gamma_{Fm} = k_b \cdot k_G \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (5.12)$$

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - b_f/b}{1 + b_f/b}} \geq 1 \text{ se } b_f/b \geq 0.25 \quad (5.13)$$

Tabela 5.3 – Valores dos parâmetros utilizados no cálculo da força de arranque máxima através da norma CNR-DT 200 R1/2013.

Parâmetros	Valores utilizados no cálculo
b_f [mm]	50
t_f [mm]	1.2
E_f [GPa]	176.19 (ver Tabela 3.4)
f_{cm} [MPa]	41.49 (ver Tabela 3.1)
f_{ctm} [MPa]	3.12
k_G [mm]	0.063

Aplicando a equação (5.11) para o caso dos ensaios experimentais realizados, o valor de força de arranque prevista pela norma tem o valor de 29.94 kN, que fica ligeiramente abaixo do valor médio obtido nos ensaios de arranque direto realizados, que foi de 30.52 kN, demonstrando assim que a norma CNR-DT 200 R1/2013 realiza uma boa previsão da força de arranque.

5.2 Ensaios de flexão

5.2.1 Técnicas EBR, EBR-GA e EBR-MA

As simulações analíticas presentes nesta dissertação, para o caso das faixas de laje reforçadas com as técnicas EBR, EBR-GA (*externally bonded reinforcement – gradient anchorage*) e EBR-MA (*externally bonded reinforcement – mechanical anchorage*), foram realizadas de acordo com a norma CNR-DT 200 R1/2013. Enquanto que na simulação analítica do comportamento da faixa de laje reforçada com a técnica NSM foi utilizada a norma ACI 440.2R-08.

A norma CNR-DT 200 R1/2013 estipula a existência de 4 modos de rotura distintos: Modo 1 – Destacamento na extremidade do laminado; Modo 2 – Destacamento intermédio do laminado; Modo 3 – Destacamento do laminado causado pelo desenvolvimento de fissuras de corte, Modo 4 – Destacamento do laminado devido a irregularidades na superfície de betão. Como as faixas de laje foram executadas em ambiente de laboratório o Modo 4 não é considerado, face ao controlo de qualidade geométrico considerado Adicionalmente, não foram observadas fissuras de corte nos provetes ensaiados, pelo que o Modo 3 também não é considerado. Assim, foram considerados os Modo 1 e Modo 2.

Modo 1 – Destacamento na extremidade do laminado

A norma CNR-DT 200 R1/2013 define o valor da resistência última, f_{fdd} , em MPa, como valor máximo de resistência permitido antes que ocorra a rotura pelas extremidades do laminado, e pode ser estimado através da expressão (5.14):

$$f_{fdd} = \frac{1}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fd}}{t_f}} \quad (5.14)$$

onde $\gamma_{f,d}$ é um coeficiente parcial, assumido como 1.0 para obter a resistência última esperada (parâmetro adimensional); E_f é o módulo de elasticidade do laminado, em [MPa]; t_f é a espessura do laminado, em [mm]; e Γ_{Fd} é a energia de fratura da interface laminado/betão, em [N/mm], e é calculada através da equação (5.15):

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{FC} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}} \quad (5.15)$$

onde k_G é um coeficiente corretivo adicional, em [mm], que considera o sistema de ligação (igual a 0.063 para sistema pré-curados); FC é um coeficiente de confiança (parâmetro adimensional), assumido como 1.0; f_{cm} e f_{ctm} são, respetivamente, a resistência à compressão e à tração, em [MPa]; e k_b é um coeficiente geométrico corretivo (parâmetro adimensional). Para valores onde o rácio entre a largura do laminado (b_f) e a largura da secção de betão (b) são menores do que 0.25 ($b_f/b < 0.25$), o coeficiente geométrico é igual a 1.18. Nos restantes casos ($b_f/b \geq 0.25$), k_b pode ser calculado através da expressão (5.16):

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - b_f/b}{1 + b_f/b}} \geq 1 \quad (5.16)$$

A norma CNR-DT 200 R1/2013 também define o comprimento ótimo de ancoragem, l_{ed} , em [mm], que é o comprimento mínimo necessário para alcançar a resistência máxima de ancoragem:

$$l_{ed} = \max \left\{ \frac{1}{\gamma_{Rd} \cdot f_{bd}} \cdot \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_{Fd}}{2}}, 200 \text{ mm} \right\} \quad (5.17)$$

onde γ_{Rd} é um coeficiente corretivo igual a 1.25 e f_{bd} é a resistência de ancoragem de desenho entre o laminado e o betão, em [MPa], igual a $2 \cdot \Gamma_{Fd}/s_u$, com $s_u = 0.25$ mm. Note-se que a norma italiana estipula que para comprimentos ótimos de ancoragem menores do que 200 mm, deve ser utilizado o valor de 200 mm.

Modo 2 – Destacamento intermédio do laminado

A rotura devido ao destacamento intermédio do laminado ocorre quando a variação da tensão no sistema FRP entre duas fissuras de flexão subsequentes excedem o limite da ligação. Tipicamente, o limite da ligação depende da distância entre fissuras de corte, do nível de tensão no laminado e das características da ligação entre o betão e o laminado. A norma CNR-DT 200 R1/2013 propõem uma fórmula para o cálculo da resistência máxima do sistema FRP na ocorrência do destacamento intermédio (Modo 2):

$$f_{fad,2} = \frac{k_q}{\gamma_{f,d}} \cdot \sqrt{\frac{E_f}{t_f} \cdot \frac{2 \cdot k_b \cdot k_{G,2}}{FC} \cdot \sqrt{f_{cm} \cdot f_{ctm}}} \quad (5.18)$$

sendo k_q um coeficiente que considera as distribuições das cargas (1.25 para cargas distribuídas e 1.0 para todas as outras configurações de carga); e $k_{G,2}$ é um coeficiente corretivo de calibração da fórmula proposta obtido através de resultados de ensaios experimentais e é igual a 0.10 mm independentemente do tipo de reforço.

No cálculo de f_{fad} e $f_{fad,2}$, para além dos valores já mencionados, foram utilizados os valores que se apresentam na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Valores dos parâmetros utilizados no cálculo dos níveis de tensão pela norma CNR-DT 200 R1/2013.

Parâmetros	Valores utilizados no cálculo
b_f [mm] ⁽¹⁾	100
b_f [mm] ⁽²⁾	50
t_f [mm]	1.2
E_f [GPa] ⁽¹⁾	196.84 (ver Tabela 3.4)
E_f [GPa] ⁽²⁾	176.19 (ver Tabela 3.4)
f_{cm} [MPa]	41.49 (ver Tabela 3.1)
f_{ctm} [MPa]	3.12

Notas: ⁽¹⁾ EBR; ⁽²⁾ EBR-GA e EBR-MA.

Tendo por base a formulação acima referida, foi calculado o nível de tensão esperado no início do destacamento do laminado de CFRP (*carbon fiber-reinforced polymer*) no Modo 1 e Modo 2 – Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Estudo dos modos de rotura.

	f_{fda} [MPa]	Γ_{Fd} [N/mm]	l_{ed} [mm]	$f_{fda,2}$ [MPa]
SL_EBR_TO	318.20	0.31	194.34	663.49
SL_EBR_MA_TO	301.05	0.31	183.86	627.73
SL_EBR_GA_TO	301.05	0.31	183.86	627.73

Nota: de acordo com a CNR-DT 200 R1/2013 deve ser adotado um comprimento de ancoragem mínimo de 200 mm.

Importa referir que, apesar de ter sido realizado o estudo de ambos os modos de rotura para as três faixas de laje reforçadas com as técnicas EBR, EBR-GA e EBR-MA, a faixa de laje reforçada com a técnica EBR-MA não é suscetível à rotura por destacamento da extremidade do laminado, uma vez que ambas as extremidades do laminado estão ancoradas à faixa de laje, impedindo que ocorra o destacamento destes.

Através de uma análise das secções transversais das faixas de laje, é possível prever a carga última/distribuição de momentos para os quais as faixas de laje entram em rotura por destacamento dos laminados (Modo 1 ou Modo 2). Na Fig. 5.1 são apresentados os resultados das análises das secções transversais, nomeadamente os diagramas de momentos fletores obtidos: (i) experimentalmente na máxima carga registada (F_{max}); (ii) para o destacamento da extremidade dos laminados (Modo 1) através de uma análise das secções transversais; e (iii) para o destacamento intermédio dos laminados (Modo 2), também através de uma análise das secções transversais. Foi adotada, nas análises das secções transversais, a relação não linear tensão-extensão definida na norma NP EN 1992-1-1:2008:

$$\sigma_c = f_{cm} \cdot \frac{1.05 \cdot \frac{E_{cm} \cdot |\varepsilon_{c1}| \cdot (\varepsilon_c)}{f_{cm}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 + \left(1.05 \cdot \frac{E_{cm} \cdot |\varepsilon_{c1}| \cdot 2}{f_{cm}}\right) \cdot \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)} \quad (5.19)$$

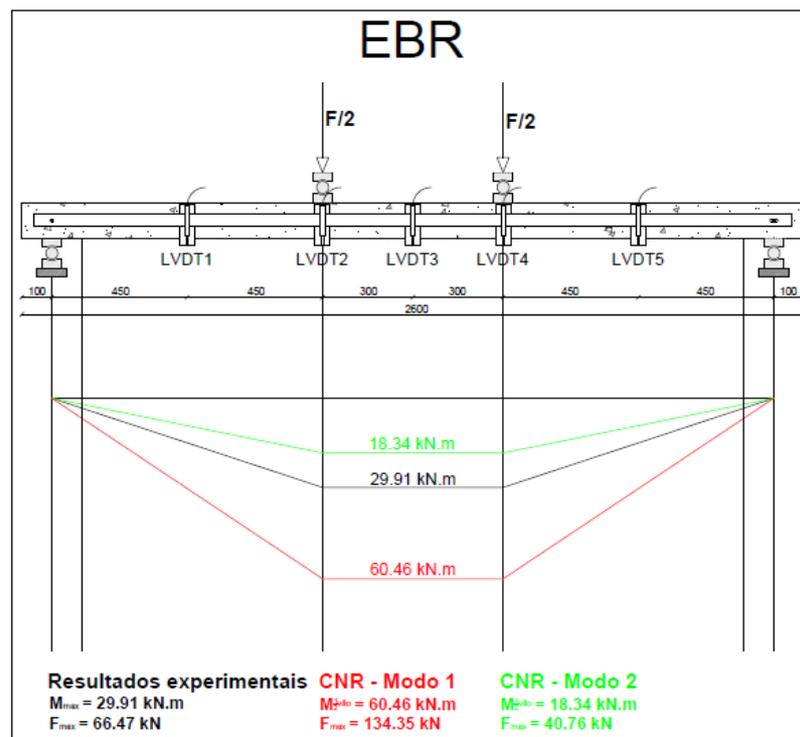
onde E_{cm} é o módulo de elasticidade do betão, em [MPa]; f_{cm} é a resistência média à compressão do betão, em [MPa]; ε_c é a extensão no betão, adimensional; e ε_{c1} é a extensão correspondente à tensão de pico, adimensional, calculada segundo a expressão (5.20):

$$\varepsilon_{c1} = 7 \cdot 10^{-4} \cdot f_{cm}^{0.31} \leq 2.8 \cdot 10^{-3} \quad (5.20)$$

Tendo por base a tensão máxima nos laminados de CFRP, $f_{fda,2}$, foi calculada a respetiva extensão expectável na rotura pelo destacamento intermédio dos laminados, $\varepsilon_{fda,2}$, e, analisando a secções transversais, foram estimados os momentos fletores expectáveis a meio vão, $M_{fda,2}$. De seguida, foi obtida a carga, $F_{fda,2}$, necessária para produzir o momento $M_{fda,2}$. Um processo análogo foi utilizado na rotura pelo destacamento da extremidade dos laminados.

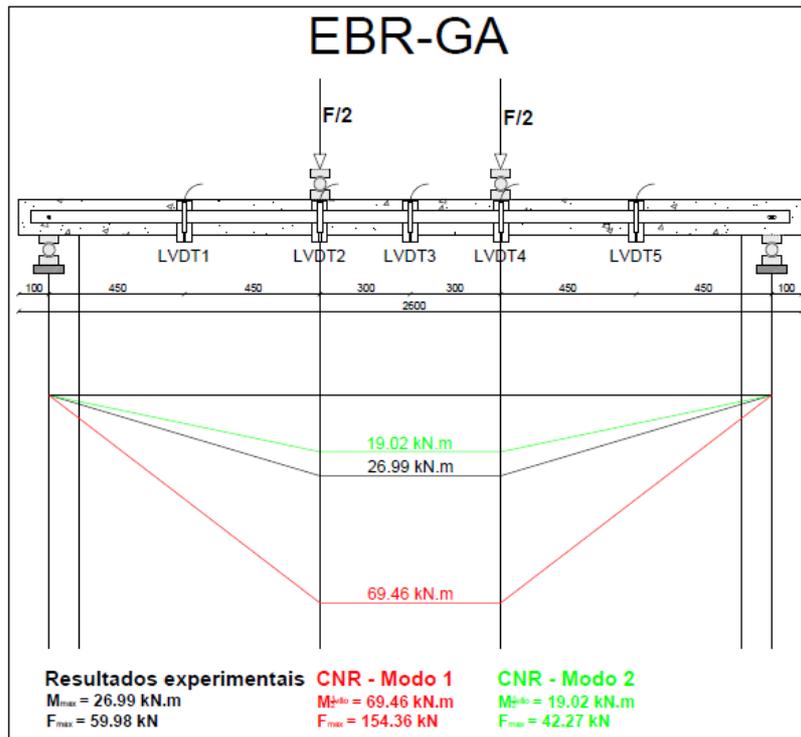
Tabela 5.6 – Comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e os resultados obtidos através da norma CNR-DT 200 R1/2013.

Faixa de laje	F_{max} [kN]		
	Exp.	Modo 1	Modo 2
EBR	66.47	134.35	40.76
EBR-GA	59.98	154.36	42.27
EBR-MA	67.62	154.36	42.27

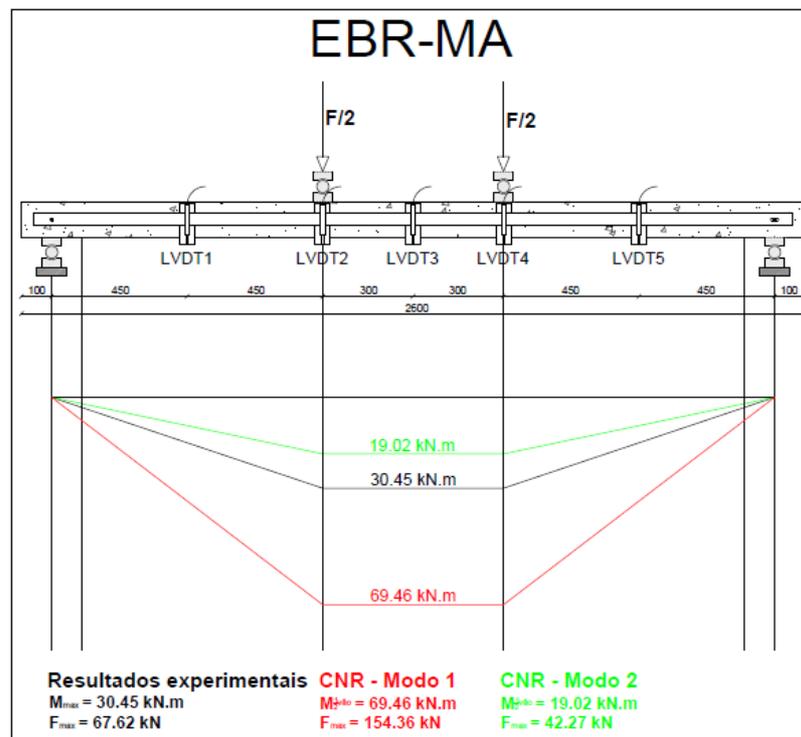


(a)

Fig. 5.1 – Comparação dos resultados obtidos experimentalmente com os resultados obtidos através da norma CNR-DT 200 R1/2013: (a) faixa de laje reforçada com a técnica EBR; (b) faixa de laje reforçada com a técnica EBR-GA; (c) faixa de laje reforçada com a técnica EBR-MA.



(b)



(c)

Fig. 5.1 (cont.) – Comparação dos resultados obtidos experimentalmente com os resultados obtidos através da norma CNR-DT 200 R1/2013: (a) faixa de laje reforçada com a técnica EBR; (b) faixa de laje reforçada com a técnica EBR-GA; (c) faixa de laje reforçada com a técnica EBR-MA.

5.2.2 Técnica NSM

A norma ACI 440.2R-08 apenas inclui procedimentos para o reforço à flexão com a técnica NSM e não toma em conta os modos de rotura à flexão no estado limite último. Adicionalmente, esta norma não considera a influência do tipo de adesivo. Para prevenir o eventual destacamento intermédio dos laminados induzido pela fissuração, a norma recomenda que a extensão efetiva do reforço deve ser limitada ao nível de extensão em que o destacamento do reforço pode ocorrer, ε_{fd} . Para o caso da técnica NSM, a norma ACI 440.2R-08 recomenda a utilização de $\varepsilon_{fd} = 0.7\varepsilon_{fu}$, onde ε_{fu} é a extensão última do CFRP. Assim, aplicando esta recomendação à faixa de laje reforçada com a técnica NSM de que faz parte esta dissertação, foi obtida a carga máxima, F_{max} , igual a 45.45 kN (ver Fig. 5.2). Considerando os resultados obtidos no ensaio experimental desta faixa de laje, constata-se que a norma ACI 440.2R-08 subestima, como seria de prever, o valor da carga máxima, F_{max} , obtida no ensaio experimental que foi de 62.28 kN. Esta diferença entre o valor obtido experimentalmente e o valor calculado através da norma explica-se devido à limitação da extensão no CFRP, nomeadamente $\varepsilon_{fd} = 0.7\varepsilon_{fu}$, que redundava no facto de a norma ACI 440.2R-08 subestimar o valor da carga máxima, como é desejável em contexto de projeto.

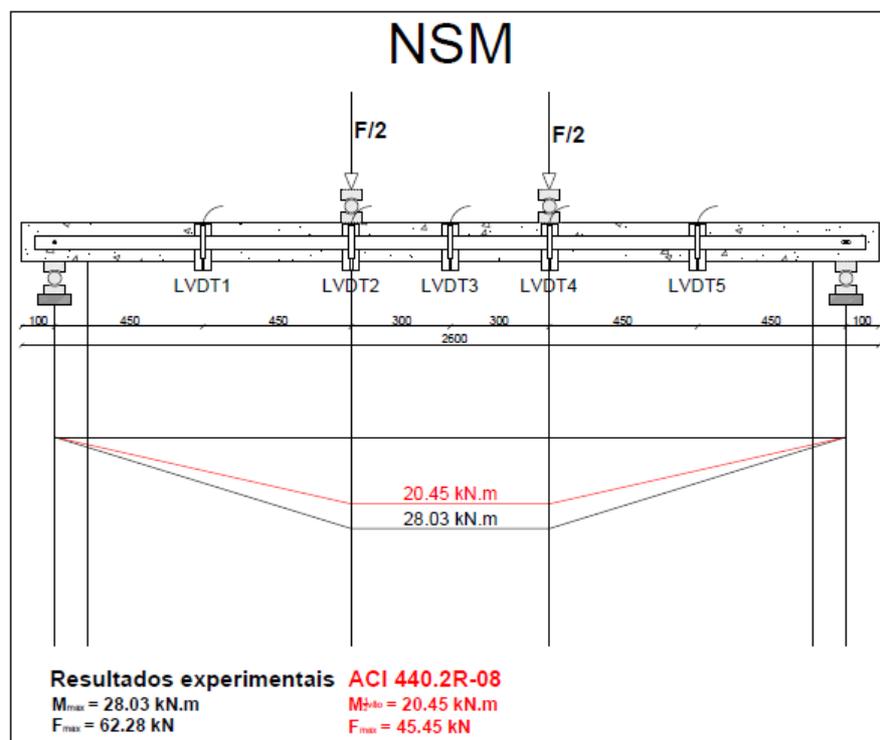


Fig. 5.2 – Comparação do resultado obtido experimentalmente com o resultado obtido através da norma ACI 440.2R-08.

6. CONCLUSÕES

O trabalho experimental e analítico desenvolvido no âmbito da presente dissertação, inserida no projeto *FRPLongDur*, teve como objetivo principal avaliar o comportamento mecânico da série T0. A investigação experimental foi constituída por dois tipos de ensaios: (i) ensaios de arranque direto para estudar os comportamentos das ligações entre o sistema EBR (*externally bonded reinforcement*) e o betão e entre o sistema NSM (*near-surface mounted*) e o betão, e (ii) ensaios de flexão em faixas de laje de betão armado reforçadas com as técnicas NSM, EBR, EBR-GA (*externally bonded reinforcement – gradient anchorage*) e EBR-MA (*externally bonded reinforcement – mechanical anchorage*).

6.1 Programa experimental

Previamente aos ensaios realizados, foi necessário preparar a superfície de contacto entre o betão e o adesivo recorrendo-se a jato de areia nos provetes reforçados com a técnica EBR utilizados nos ensaios de aderência e nas faixas de laje reforçadas com as técnicas EBR, EBR-GA e EBR-MA utilizadas nos ensaios à flexão. Analisando os resultados obtidos nos ensaios, nomeadamente nos ensaios de aderência dos provetes reforçados com a técnica EBR, é possível constatar, dada a homogeneidade da resposta dos mesmos, que a execução do tratamento de superfície recorrendo a jato de areia permitiu obter rugosidades finais equivalentes. O facto dos laminados de CFRP, em todos os provetes ensaiados, terem em toda a sua extensão ou em parte dela uma camada de betão agarrada, atesta a boa ligação adesivo-betão que este tratamento de superfície permite obter.

Os principais desafios encontrados no reforço dos provetes de aderência reforçados com a técnica EBR foram a necessidade de garantir o comprimento de amarração pretendido, a espessura do adesivo epóxi pretendida e a posição dos laminados que se pretendia ortogonal em relação à face de topo dos provetes para que se evitasse introduzir excentricidades que, aquando da realização dos ensaios de arranque direto, se revelassem um fator problemático. O comprimento de amarração foi garantido utilizando fita adesiva que impediu que o adesivo entrasse em contacto com o betão nas regiões onde tal não era pretendido. Para controlar a espessura do adesivo epóxi foram utilizados espaçadores que foram colocados entre os laminados e as superfícies de betão. Finalmente, para garantir o posicionamento correto dos laminados em relação à geometria dos provetes foi criado um procedimento que consistiu em controlar através de esquadros o posicionamento dos mesmos.

O reforço dos provetes de aderência reforçados com a técnica NSM teve como principais desafios conseguir colocar os laminados numa posição central relativamente à secção transversal dos entalhes e controlar o comprimento de ancoragem dos mesmos. Estes desafios foram ultrapassados recorrendo a dois tipos de acessórios diferentes: (i) para garantir que os laminados ficassem centrados em relação à secção transversal dos entalhes, foram utilizadas peças em silicone que depois de aplicadas nos laminados garantiram que estes ficassem colocados onde se pretendia; (ii) para garantir que os comprimentos de ancoragem fossem os pretendidos, foram colocadas máscaras nos provetes de forma a que o adesivo apenas entrasse em contacto com a região de betão pretendida. O facto de os resultados obtidos nos ensaios de aderência terem revelado coeficientes de variação muito baixos, atestam que os desafios descritos foram ultrapassados.

Relativamente ao reforço das faixas de laje foram encontrados diversos desafios. Nas faixas de laje reforçadas com a técnica NSM houve a necessidade de introduzir cuidadosamente os laminados nos entalhes para que estes ficassem centrados em relação à secção transversal dos mesmos. Já nas faixas de laje reforçadas com a técnica EBR os desafios foram garantir uma espessura homogénea do adesivo epóxi ao longo do seu desenvolvimento. Tal foi conseguido utilizando espaçadores em diversos pontos ao longo do comprimento dos laminados e, também, recorrendo a uma caixa, construída no contexto do projeto, onde foi aplicado o adesivo epóxi ao laminado e que permitiu garantir a não existência de vazios na camada de adesivo epóxi. Foi também necessário garantir que o adesivo epóxi entrasse em contacto apenas com a área da superfície de betão pretendida, coisa que foi conseguida recorrendo a máscaras que o garantiram.

Em relação ao reforço das faixas de laje reforçadas com as técnicas EBR-GA e EBR-MA, os principais desafios foram a aplicação do pré-esforço e a obrigatoriedade de realizar o reforço na janela temporal permitida pelo adesivo epóxi. O adesivo epóxi tem uma janela de trabalhabilidade que não pode ser ultrapassada, pois corre-se o risco de o mesmo ficar num estado que dificulta a sua aplicação. Assim, foi necessária uma grande coordenação no processo de reforço dos mesmos.

6.2 Ensaios de aderência

Com os comprimentos de amarração adotados no programa experimental, no caso dos provetes NSM, foi possível atingir cerca de 80% da resistência à tração dos laminados, já no caso dos provetes EBR apenas foi possível atingir cerca de 20% da resistência à tração dos laminados. Assim, conclui-se

que os comprimentos de amarração adotados foram suficientes no caso dos provetes NSM, mas foram insuficientes no caso dos provetes EBR.

As médias das forças de arranque máximas obtidas em ambos os casos, nos provetes NSM e nos provetes EBR, são muito parecidas. E, como se tratam de provetes com laminados de CFRP com áreas de secções transversais muito diferentes, conclui-se que as médias das forças de arranque máximas obtidas foram governadas, não pela resistência à tração dos laminados, mas pelas diferentes características das ligações dos dois sistemas.

Os modos de rotura observados, no caso dos provetes NSM, indicam que é possível explorar de forma satisfatória, a resistência à tração dos laminados de CFRP, uma vez que todos os provetes romperam na ligação laminado-adesivo. Já no caso dos provetes EBR torna-se evidente, dado os modos de rotura observados, que a ligação entre o laminado e o betão é governada pela resistência à tração do betão.

6.3 Ensaio de flexão

Pode, desde logo, observar-se que as técnicas de reforço utilizadas no programa experimental permitiram, como seria de esperar, melhorar o comportamento das faixas de laje à flexão, uma vez que as forças no início da fendilhação, na plastificação das armaduras e na carga máxima registada da faixa de laje de referência (sem reforço) foram inferiores às respectivas forças das faixas de laje reforçadas.

Relativamente às faixas de laje reforçadas segundo as técnicas NSM e EBR-MA, importa dizer que estas apresentaram um comportamento à flexão superior ao apresentado pelas faixas de laje reforçadas com as técnicas EBR e EBR-GA. O deslocamento a meio vão das primeiras, quando foram atingidos os valores de carga máximo registados, foi cerca de 93.31% superior ao deslocamento a meio vão apresentado pelas faixas de laje EBR e EBR-GA. Este dado indica que as faixas de laje NSM e EBR-MA apresentaram, como é desejável, um comportamento mais dúctil do que as faixas de laje EBR e EBR-GA.

Há uma diferença entre os modos de rotura observados nas faixas de laje NSM e EBR-MA e os modos de rotura observados nas faixas de laje EBR e EBR-MA. Nas primeiras foi esgotada a capacidade resistente dos laminados, tendo ocorrido a rotura à tração dos laminados, enquanto que nas segundas ocorreu o destacamento do sistema de reforço, não tendo sido possível explorar a totalidade da capacidade resistente dos laminados. Assim, as técnicas de reforço empregues nas faixas de laje NSM e EBR-MA demonstraram ser mais eficientes.

Os diferentes sistemas de ancoragens nas faixas de laje pré-esforçadas apresentaram comportamentos diferentes, tendo a faixa de laje EBR-MA apresentado um comportamento superior relativamente à faixa de laje EBR-GA, principalmente, porque no caso da primeira foi possível esgotar a capacidade resistente do laminado, enquanto que no caso da segunda o mesmo não foi possível. Na faixa de laje EBR-GA, ocorreu o destacamento do sistema de reforço num nível de deslocamento vertical a meio vão muito inferior ao apresentado pela faixa de laje EBR-MA.

Analisando os valores dos deslocamentos verticais a meio vão das faixas de laje pré-esforçadas, quando foram atingidos os valores das forças no início da fendilhação, constata-se que o pré-esforço melhorou significativamente o comportamento em serviço das faixas de laje pré-esforçadas, pois aquando da abertura das primeiras fendas, os níveis de carga registados nas faixas de laje pré-esforçadas foi cerca de 49.32% superior em relação aos níveis de carga registados nas faixas de laje não pré-esforçadas.

6.4 Simulações analíticas

As simulações analíticas realizadas, no caso dos ensaios de arranque direto dos provetes reforçados com a técnica EBR, revelaram que é possível, recorrendo à norma CNR-DT 200 R1/2013, obter uma excelente previsão da força de arranque máxima. Já no caso dos ensaios de arranque direto dos provetes reforçados com a técnica NSM, as normas não permitem ter uma boa previsão da força de arranque máxima. Há diferença entre as previsões das duas normas utilizadas, a previsão da norma SA HB 305-2008 aproximou-se mais do valor médio obtido experimentalmente do que a previsão da norma ACI 440.2R-08. O modo como as formulações sugeridas pelas normas foram calibradas, no caso da norma ACI 440.2R-08, a utilização de um valor de tensão de aderência média, τ_{avg} , igual a 6.9 MPa, muito inferior ao observado nos ensaios de aderência realizados e, no caso da norma SA HB 305-2008, a utilização de coeficientes nas equações para o cálculo da tensão de aderência máxima, τ_{max} , e para o cálculo de δ_{max} , explicam as diferenças encontradas entre os valores da força de arranque máxima obtidos experimentalmente e os valores calculados através das duas normas.

A simulação analítica realizada, recorrendo à norma ACI 440.2R-08, para o caso do ensaio à flexão da faixa de laje reforçada com a técnica NSM, demonstrou que a norma realiza uma boa previsão da força necessária para levar o provete ensaiado à rotura. Esta subestima em, aproximadamente, 27% a força necessária para levar o provete à rotura. Esta diferença, entre o valor obtido experimentalmente e o valor calculado através da norma explica-se com a limitação da extensão do CFRP (*carbon fiber-reinforced polymer*) preconizada pela norma.

As simulações analíticas realizadas para o caso das faixas de laje reforçadas com as técnicas EBR, EBR-GA e EBR-MA, recorrendo à norma CNR-DT 200 R1/2013, revelaram que para o modo de rotura número 1, destacamento da extremidade do laminado, o valor obtido através da utilização da norma fica muito longe do valor obtido experimentalmente. E, quando o modo de rotura número 2, destacamento intermédio do laminado, foi utilizado, a norma revelou obter uma melhor previsão da resistência última das faixas de laje, não tendo sido possível, no entanto, obter boas previsões. É difícil avaliar as previsões dadas pela norma no modo de rotura número 1, já que quando as faixas de laje entraram em rotura devido à rotura do laminado, o destacamento ocorreu a meio vão. No entanto, pela mesma razão é possível avaliar as previsões dadas pela norma aquando a ocorrência do modo de rotura número 2 e, constata-se que esta não é capaz de obter uma boa previsão da força necessária para levar a faixa de laje à rotura.

6.5 Futuros desenvolvimentos

Seria muito bom que fosse possível obter níveis de ductilidade nas técnicas de reforço EBR, EBR-GA e EBR-MA semelhantes ao obtido com a técnica NSM, por isso recomenda-se o aprofundamento do conhecimento e desenvolvimento destas técnicas que permitam no futuro obter respostas semelhantes. Para que seja possível atingir este objetivo sugere-se que sejam estudados novos tratamentos de superfície.

Relativamente às simulações analíticas realizadas, propõe-se o desenvolvimento de novas expressões que sejam capazes de reproduzir com maior rigor os resultados que se observam experimentalmente. Para tal sugere-se que, tendo por base resultados experimentais, se desenvolva uma análise paramétrica das expressões com o objetivo de as calibrar até que sejam capazes de reproduzir com rigor os valores observados experimentalmente.

BIBLIOGRAFIA

ACI 440.2R-08. **Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures**: American Concrete Institute 2011.

CNR-DT 200 R1/2013. **Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati**. CNR-DT 200 R1/2013 2013.

COELHO, M. R. F.; SENA-CRUZ, JOSÉ M.; NEVES, LUÍS A. C.; PEREIRA, MARTA; CORTEZ, PAULO; MIRANDA TIAGO. Using data mining algorithms to predict the bond strength of NSM FRP systems in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 126, p. 484-495, 2016/11/15/ 2016. ISSN 0950-0618. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181631488X> >.

CORREIA, L.; TEIXEIRA, TIAGO; MICHELS, JULIEN; ALMEIDA, JOÃO A. P. P.; SENA-CRUZ, JOSÉ. Flexural behaviour of RC slabs strengthened with prestressed CFRP strips using different anchorage systems. **Composites Part B: Engineering**, v. 81, p. 158-170, 2015/11/01/ 2015. ISSN 1359-8368. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836815004217> >.

COSTA, A. **Inspecção e avaliação de estruturas de betão armado**. Lisboa: Departamento de Engenharia Civil (Instituto Superior Técnico): 62 p. 2011.

CRUZ, R. **Influência do tipo de adesivo no comportamento de elementos de betão reforçados com laminados de CFRP de acordo com a técnica NSM**. 2016. 148 (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho

DANRAKA, M.; H, MAHIR; OJO-KUPOLUYI, OLUWATOSIN. **Strengthening of Reinforced Concrete Beams using FRP Technique: A Review**. 2017. 13199-13213.

EL-HACHA, R.; WIGHT, R.; GREEN, M. Prestressed fibre-reinforced polymer laminates for strengthening structures. **Progress in Structural Engineering and Materials**, v. 3, n. 2, p. 111-121, 2001. Disponível em: < <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pse.76> >.

EMARA, M.; BARRIS, C.; BAENA, M.; TORRES, L.; BARROS, J.. Bond behavior of NSM CFRP laminates in concrete under sustained loading. **Construction and Building Materials**, v. 177, p. 237-246, 2018/07/20/ 2018. ISSN 0950-0618. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818311164> >.

HEIZA, K.; NABIL, AHMED; MELEKA, NAGEH; TAYEL, MAGDY. **State-of-the Art Review: Strengthening of Reinforced Concrete Structures – Different Strengthening Techniques** 2014.

HOLLAWAY, L. C. 1 - Key issues in the use of fibre reinforced polymer (FRP) composites in the rehabilitation and retrofitting of concrete structures. In: KARBHARI, V. M. e LEE, L. S. (Ed.). **Service Life Estimation and Extension of Civil Engineering Structures**: Woodhead Publishing, 2011. p.3-74. ISBN 978-1-84569-398-5.

ISO 527-2:2012. **Plastics - Determination of tensile properties - Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics**: ISO 2012.

ISO 527-5:2009. **Plastics - Determination of tensile properties - Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites**: ISO 2009.

JUMAAT, Z.; M. M, R.; RAHMAN, M. **Review on bonding techniques of CFRP in strengthening concrete structures**. 2011. 3567-3575.

MOHAMMAD BANIJAMALI, S. **Reviewing the FRP Strengthening Systems**. 2015. 38.

MOTAVALLI, M.; CZADERSKI, C.; PFYL-LANG, K. Prestressed CFRP for Strengthening of Reinforced Concrete Structures: Recent Developments at Empa, Switzerland. **Journal of Composites for Construction**, v. 15, n. 2, p. 194-205, 2011. Disponível em: < <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29CC.1943-5614.0000125> >.

NP EN 1992-1-1:2008. **Eurocódigo 2 - Projecto de estruturas de betão - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios**. Caparica: IPQ 2008.

NP EN 12390-3:2011. **Ensaio do betão endurecido - Parte 3: Resistência à compressão de provetes de ensaio**. Caparica: IPQ 2011.

NP EN 12390-13:2014. **Ensaio do betão endurecido - Parte 13: Determinação do módulo de elasticidade secante à compressão**. Caparica: IPQ 2014.

NP EN ISO 6892-1:2016. **Materiais metálicos - Ensaio de tracção - Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente**. Caparica: IPQ 2016.

PELLEGRINO, C.; SENA-CRUZ, J. **Design Procedures for the Use of Composites in Strengthening of Reinforced Concrete Structures: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 234-DUC**. 2016. ISBN 978-94-017-7335-5.

PUSCH, J.; WOHLMANN, B. Chapter 2 - Carbon Fibers. In: MAHLTIG, B. e KYOSEV, Y. (Ed.). **Inorganic and Composite Fibers**: Woodhead Publishing, 2018. p.31-51. ISBN 978-0-08-102228-3.

RASHEED, H. A. **Strengthening Design of Reinforced Concrete with FRP**. CRC Press, 2014.

SA HB 305-2008. **Design handbook for RC structures retrofitted with FRP and metal plates: beams and slabs, HB 305–2008, Standards Australia GPO Box 476**. Sydney, Australia 2008.

SEN, R. Developments in the durability of FRP-concrete bond. **Construction and Building Materials**, v. 78, p. 112-125, 2015/03/01/ 2015. ISSN 0950-0618. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814014081> >.

SENA-CRUZ, J.; BARROS, JOAQUIM; F. M. AZEVEDO, ÁLVARO; VENTURA-GOUVEIA, ANTÓNIO. **Numerical Simulation of the Nonlinear Behaviour of RC Beams Strengthened with NSM CFRP Laminate Strips**. 2014.

SILVA, P.; FERNANDES, PEDRO; SENA-CRUZ, JOSÉ; XAVIER, JOSÉ; CASTRO, FERNANDO; SOARES, DELFIM; CARNEIRO, VITOR. Effects of different environmental conditions on the mechanical characteristics of a structural epoxy. **Composites Part B: Engineering**, v. 88, p. 55-63, 2016/03/01/ 2016. ISSN 1359-8368. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836815006666> >.

SOARES, S. **Estruturas de betão armado reforçadas com laminados de CFRP: caracterização da aderência e do comportamento em flexão**. 2017. 284 (Mestrado). Escola de Engenharia, Universidade do Minho

SONNENSCHNEIN, R.; GAJDOSOVA, K.; HOLLY, I. FRP Composites and their Using in the Construction of Bridges. **Procedia Engineering**, v. 161, p. 477-482, 2016/01/01/ 2016. ISSN 1877-7058. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816328946> >.