



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

José Ricardo Ribeiro Azevedo

Reforço à flexão de lajes de betão armado  
com laminados de CFRP pré-esforçados



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

José Ricardo Ribeiro Azevedo

Reforço à flexão de lajes de betão armado  
com laminados de CFRP pré-esforçados

Dissertação de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia Civil  
Área de Especialização: Estruturas e Geotecnia

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor José Sena-Cruz

julho de 2015

*“Quatro coisas para o sucesso:  
Trabalhar e orar,  
Pensar e acreditar.”*

Norman Vincent Peale



## AGRADECIMENTOS

---

“...What makes us who we are  
should be glorified, personified  
and sung unto the stars!”

Muse

Ao longo destes últimos cinco anos, foram necessários empenho, dedicação e perseverança para culminar esta fase importante. No entanto, tal não seria possível sem a contribuição de vários intervenientes, às quais apresento o meu agradecimento:

- Ao Professor Doutor José Sena Cruz, orientador da presente dissertação, por todo o apoio, empenho, críticas, transmissão de conhecimentos perante todos os contratemplos que foram surgindo;

- Ao Tiago e ao Luís, pela amizade, pela boa disposição, pela ajuda, pelo conhecimento partilhado ao longo deste período;

- Ao Eng.º Amarílio Barbosa, pela ajuda na realização dos ensaios térmicos;

- À Professora Doutora Sandra Silva, pela ajuda na realização dos ensaios térmicos, pela boa disposição e pelos conhecimentos transmitidos;

- Ao Doutor Bahman, pela amabilidade na disponibilização do *software* de análise termográfico;

- Ao Sr. António Matos, do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho, pela ajuda na realização dos ensaios;

Também gostaria de agradecer:

- À Universidade do Minho pelas condições e disponibilização do espaço para o desenvolvimento do programa experimental;

-Este trabalho é apoiado pela FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade – COMPETE e fundos nacionais, através da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia sob o projeto FRPreDur - PTDC/ECM-EST/2424/2012.

-Agradecesse-se também a todas as empresas que estão envolvidas no desenvolvimento do projeto FRPreDur, nomeadamente: S&P Clever Reinforcement Ibérica Lda, S&P Clever

Reinforcement Company (Switzerland), Tecnipor - Gomes & Taveira Lda., Vialam – Indústrias Metalúrgicas e Metalomecânicas, Lda. e Hilti Portugal - Produtos e Serviços, Lda.

- Aos meus amigos de longa data, um muito obrigada por todo apoio, amizade, carinho e amor incondicional.

-À minha querida família, pela enorme influência na pessoa que sou hoje, nas metas atingidas, e por todos os bons momentos, amizade, carinho apoio e amor, um muito obrigada.

## RESUMO

---

O uso de materiais compósitos reforçados com fibras, *fiber reinforcement polymer (FRP)* da nomenclatura inglesa, na reabilitação ou reforço de estruturas existentes data a década de 80. Desde então, verificou-se a proliferação da aplicação de materiais compósitos, tais como os materiais compósitos reforçados com fibras de carbono, *carbon fiber reinforcement polymer (CFRP)*, no reforço à flexão de estruturas de betão armado. Associados a estes materiais têm sido propostas técnicas de reforço, tais como, a técnica de colagem externa, *Externally Bonded Reinforcement (EBR)*, e a técnica de inserção no betão de recobrimento, *Near-Surface Mounted (NSM)*. É ainda possível combinar a vantagens associadas a sistemas de reforço passivo, através de laminados FRP com os benefícios da tecnologia de pré-esforço externo, resultando diversas vantagens, quer em serviço, quer em situações de colapso.

Relativamente aos sistemas de reforço de pré-esforço externo, as ancoragens desempenham um papel fulcral no comportamento e no desempenho estruturais globais. Ultimamente, dois sistemas de ancoragem despoletaram particular interesse, nomeadamente as ancoragens metálicas, *metallic anchorage (MA)*, e as ancoragens por gradiente, *gradient anchorage (GA)*.

Na presente dissertação, os sistemas MA e GA são avaliados e comparados com recurso a lajes de betão armado. De forma a avaliar o desempenho estrutural de ambos os sistemas de ancoragem, foi realizado um estudo, composto por uma parte experimental e uma parte numérica. Em relação à componente procedimento experimental, um conjunto de lajes de betão armado não-reforçadas e lajes de betão armado reforçadas com laminados CFRP (não e pré-esforçados) foram ensaiadas até a rotura em laboratório, através de ensaios monotónicos à flexão de quatro pontos de carga, sob controlo de deslocamento, permitindo a caracterização do seu comportamento estrutural até à rotura. Além disso, a influência da geometria do laminado CFRP e do comprimento da laje também foram avaliados. No que respeita à componente numérica, simulações das lajes foram realizadas por meio do *software* SECTION, que é um programa de análise a nível da secção transversal.

Outro aspeto crucial na aplicação de laminados CFRP pré-esforçados é o comportamento da aderência entre o laminado e a superfície de betão, sendo influenciadas pelo processo de instalação e durante o seu tempo de vida em serviço. Assim, é importante monitorar a qualidade da aplicação do laminado CFRP. De modo a identificar e quantificar defeitos existentes entre a

superfície do laminado e as superfícies de betão, foi utilizada a metodologia termografia, sendo a aplicabilidade e a precisão do método adotado validado através de ensaios adequados.

Finalmente refere-se que todo este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto FRPreDur (PTDC/ECM-EST/2424/2012).

#### PALAVRAS-CHAVE

Ancoragem metálica

Ancoragem por gradiente

Estruturas de betão armado

Laminados de CFRP pré-esforçados

Reforço à flexão

Termografia



## ABSTRACT

---

The use of fiber-reinforced polymers (FRP) in rehabilitation or strengthening of existing structures dates the early 80s. Ever since, it is verified the wide spreading of the application of composite materials, such as carbon fiber-reinforced polymers (CFRP), in the flexural strengthening of reinforced concrete structures. Associated with these reinforcement materials, it have been proposed techniques such as, the Externally Bonded Reinforcement (EBR) or the Near-Surface Mounted (NSM) techniques. It is possible to combine the advantages of the passive FRP systems with the benefits of the external prestressing, resulting several advantages, whether in serviceability and failure regions.

Concerning the external prestressing strengthening systems, the end anchorage plays a major role in the structural behavior and performance of the entire configuration. Lately, two types of anchorages have become particularly interesting, namely the metallic anchorage (MA) system and the gradient anchorage (GA) system.

In the present thesis, the MA and the GA systems are evaluated and compared using slabs. In order to evaluate the structural performance of both end anchorage systems, a study, which is composed by a numerical and experimental parts, was conducted. Regarding the experimental procedure, a set of unstrengthen and strengthen (non prestressed and prestressed) CFRP slabs were loaded up to failure in laboratory, through four-point bending monotonic tests under displacement control, allowing the characterization of their structural behavior in failure region. Additionally, the influence of the cross-section geometry of the CFRP strips and the length of the slabs were also investigated. With respect to the numerical part, simulations of the slabs were carried out by using a computer software named SECTION, which is a cross-section program analysis.

Another crucial aspect in the application of the prestressed CFRP strips is the bond behavior between the laminate and concrete surface, being influenced by the installation process and during its in-service lifetime. Hence, it is important to monitor the bond quality during the application of the CFRP strip. In order to identify and to quantify the existent defects between the laminate and the concrete surfaces, IR thermography methodology was applied, being the applicability and accuracy of the adopted method validated by suitable tests.

## KEYWORDS

Flexural strengthening

Gradient anchorage

Metallic anchorage

Prestressed CFRP strips

Reinforced concrete structures

IR thermography

# ÍNDICE GERAL

---

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 ENQUADRAMENTO .....	1
1.2 OBJECTIVOS E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	3
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	5
CAPÍTULO 2. REFORÇO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO COM FRP: BREVE RESENHA.....	7
2.1 INTRODUÇÃO .....	7
2.1.1 CONSTITUIÇÃO DOS FRP .....	10
2.1.2 MATRIZ POLIMÉRICA .....	12
2.1.3 FIBRAS .....	13
2.1.5 PROCESSO DE PRODUÇÃO.....	17
2.2 ADESIVOS.....	18
2.2.1 PROPRIEDADES DOS ADESIVOS.....	20
2.2.2 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS .....	21
2.3 REQUISITOS PARA A COLAGEM DO LAMINADO .....	24
2.4 TÉCNICAS DE REFORÇO .....	25
2.4.1 SISTEMA NSM ( <i>NEAR-SURFACE MOUNTED</i> ).....	25
2.4.2 SISTEMA EBR ( <i>EXTERNALLY BONDED REINFORCEMENT</i> ).....	28
2.4.2.1 COMPORTAMENTO MECÂNICO.....	30
2.4.2.2 MODOS DE ROTURA .....	32
2.5 PRÉ-ESFORÇO.....	34
2.5.1 TÉCNICAS DE APLICAÇÃO DE PRÉ-ESFORÇO .....	35
2.5.1.1 SISTEMA DE IMPOSIÇÃO DE CONTRA-FLECHA .....	35
2.5.1.2 SISTEMA DE PRÉ-TENSÃO.....	36
2.5.3 NÍVEL DE PRÉ-ESFORÇO .....	38

2.5.4	SISTEMAS DE ANCORAGEM .....	39
2.5.4.2	ANCORAGENS METÁLICAS .....	40
2.5.4.2	ANCORAGEM POR GRADIENTE.....	40
2.6	CONCLUSÕES .....	42
CAPÍTULO 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....		45
3.1	PROVETES E CONFIGURAÇÃO DOS ENSAIOS.....	45
3.1.1	CÁLCULO DA ARMADURA NECESSÁRIA .....	46
3.1.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ESTRUTURAIS .....	47
3.1.2.1	BETÃO.....	47
3.1.2.2	AÇO.....	51
3.1.2.3	LAMINADO DE CFRP .....	53
3.1.2.4	ADESIVO EPOXY .....	55
3.1.3	PROGRAMA DE ENSAIOS.....	57
3.1.4	INSTRUMENTAÇÃO & CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO .....	58
3.2	PROCEDIMENTOS DE APLICAÇÃO DO REFORÇO .....	59
3.3	CONCLUSÕES.....	65
CAPÍTULO 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....		67
4.1	COMPORTAMENTO À ROTURA .....	67
4.2	LARGURA DE FENDAS.....	74
4.3	ESPAÇAMENTO ENTRE FENDAS .....	75
4.4	CONCLUSÕES.....	76
CAPÍTULO 5. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....		79
5.1	INTRODUÇÃO.....	79
5.2	DESCRIÇÃO DO SOFTWARE .....	79
5.2.1	MODELO NLMM201 .....	81
5.2.2	MODELO NLMM202.....	83

5.2.3 MODELO NLMM203 .....	85
5.3 RESULTADOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES.....	88
5.3 CONCLUSÕES .....	92
CAPÍTULO 6. CONTROLO DE QUALIDADE DOS SISTEMAS DE REFORÇO.....	93
6.1 INTRODUÇÃO .....	93
6.2 MÉTODO TERMOGRÁFICO POR INFRAVERMELHOS.....	94
6.2.1 ANÁLISE QUANTITATIVA POR TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS .....	96
6.2.2 MÁXIMO CONTRASTE TÉRMICO .....	97
6.2.3. ALGORITMO DE DOIS PONTOS DE INFLEXÃO NA DEFINIÇÃO DOS LIMITES DO DEFEITO.....	99
6.3 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA .....	100
6.3.1 PREPARAÇÃO DOS PROVETES .....	100
6.3.2 PROCEDIMENTO.....	101
6.3.2 RESULTADOS DA VALIDAÇÃO .....	102
6.4 ANÁLISE TERMOGRÁFICA EM LAJES REFORÇADAS COM LAMINADOS PRÉ- ESFORÇADOS CFRP .....	104
6.5 CONCLUSÃO .....	108
CAPÍTULO 7. CONCLUSÕES FINAIS E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS.....	109
7.1 CONCLUSÕES FINAIS .....	109
7.2 FUTURO DESENVOLVIMENTOS.....	111
REFERÊNCIAS .....	113



## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1.1: Organigrama do Projeto FRPreDur.....	4
Figura 2.1: Esquema ilustrativo da disposição das fibras no interior da matriz (ISIS 2006) ...	10
Figura 2.2: Relação tensão-deformação das fibras de reforço e da matriz (ISIS 2007) .....	11
Figura 2.3: Comparação de algumas propriedades entre o aço, alumínio e o compósito (Juvandes 2002).....	11
Figura 2.4: Variação teórica do módulo de elasticidade com o aumento do ângulo relativo à direção principal das fibras (Hutchinson and Hollaway 1999). .....	13
Figura 2.5: a) Classificação das fibras; b) Comportamento à tração de fibras e metais (Juvandes 2002).....	14
Figura 2.6: a) reforço à flexão de uma laje; b) reforço à flexão de uma viga; c) reforço ao corte e confinamento de um pilar de betão; d) confinamento de um tanque de betão; e) reforço ao corte de uma zona de nó viga/pilar (fib 2001).....	16
Figura 2.7: (a) processo de fabrico de compósitos CFRP por pultrusão; (b) Aspeto final dos laminados; (c) Disposição dos materiais constituintes dos laminados; (d) laminados armazenados em rolos. (Firmo 2010) .....	18
Figura 2.8 Comparação de tensão vs. extensão de diferentes tipos de epóxi (Hutchinson and Hollaway 1999) .....	22
Figura 2.9 Influência da transição vítrea (a) no volume; (b) na rigidez (Hutchinson and Hollaway 1999) .....	22
Figura 2.10- a) Influência do aumento de temperatura na resistência ao corte de colas epoxídicas com e sem a presença de humidade; b) influência da presença de humidade na resistência ao corte de uma cola epoxídica a uma temperatura constante de 20° C; c) influência da presença de humidade na resistência à tração em colas epoxídicas (Hutchinson and Hollaway 1999)..	23
Figura 2.11 Técnicas de reforço com recurso a laminados de carbono (CFRP) (J. Sena-Cruz 2011).....	25
Figura 2.12: Esquema do sistema de aplicação do reforço de acordo com a técnica NSM (Sena-Cruz, 2002) .....	26
Figura 2.13: Procedimento de aplicação de reforço de acordo com o sistema NSM (Almeida 2013).....	27
Figura 2.14 (a) Pormenor de aplicação de Laminados; (b) Reforço por adição de laminados (Carvalho 2010).....	29

Figura 2.15: Diagrama multilinear carga-deslocamento central de vigas reforçadas à flexão com laminados de CFRP (Firmo 2010). .....	30
Figura 2.16: Diagramas momento-curvatura a meio vão de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP (Firmo, 2010). .....	31
Figura 2.17: evolução do destacamento do laminado numa viga reforçada típica (Hutchinson and Hollaway 1999). .....	32
Figura 2.18: Possíveis modos de rotura em elementos de BA reforçados com laminados CFRP (Juvandes 2002). .....	34
Figura 2.19: Exemplo de aplicação do sistema de pré-esforço por indução de uma contra-flecha. (a) Aplicação de uma força vertical de baixo para cima, através de macacos hidráulicos; (b) Posicionamento e colagem dos laminados; (c) Remoção dos macacos hidráulicos (R El-Hacha, Wight, and Green 2001). .....	36
Figura 2.20: Aplicação de pré-esforço ao laminado por um equipamento independente à viga. a) Amarração e tração do laminado no aparelho de pré-esforço. b) Colagem do laminado tracionado. Cura da cola epoxídica. c) Corte do laminado nas ancoragens e transferência do esforço ao compósito (R El-Hacha, Wight, and Green 2001). .....	37
Figura 2.21: Aplicação de pré-esforço ao FRP pelo sistema de pós-tensão. Realização de uma ancoragem e aplicação de tensão ao laminado (R El-Hacha, Wight, and Green 2001). .....	37
Figura 2.22 a) sistema EBR pré esforçado com ancoragem metálica; b) sistema pré esforçado com ancoragem por gradiente de esforços (Michels, Martinelli, et al. 2014). .....	40
Figura 2.23: (a) Representação esquemática da ancoragem por gradiente; (b) Forças transferidas nos diferentes segmentos de gradiente (Michels, Sena-Cruz, et al. 2013). .....	42
Figura 3.1: Geometria da secção transversal .....	45
Figura 3.2: Geometria e configuração de ensaio: a) secção transversal; b) secção longitudinal. ....	46
Figura 3.3: a) Aspeto geral da prensa; b) pormenor de um provete cilíndrico antes do ensaio; c) pormenor de um provete cilíndrico após rotura. ....	47
Figura 3.4: Relação tensão-extensão para um carregamento de compressão uniaxial de curto prazo de um provete de betão. ....	48
Figura 3.5: comportamento do betão ao longo do ensaio de compressão uniaxial correspondente às diferentes betonagens; a) betonagem realizada no dia 16/07/2013; b) betonagem realizada no dia 18/07/2013; c) betonagem realizada no dia 24/07/2013; d) betonagem realizada no dia 30/07/2013. ....	50



Figura 3.6: a) Aspecto geral dos ensaios de caracterização do aço; b) e pormenor do ensaio de tração .....	51
Figura 3.7: Relação tensão-deformação dos provetes de aço de Ø6 .....	52
Figura 3.8: Relação tensão-extensão dos provetes de aço de Ø8 .....	52
Figura 3.9: esquema de ensaio de caracterização dos laminados (Michels, Sena-Cruz, et al. 2013).....	53
Figura 3.10: a) ensaio à tração do provete CFRP; b) aspecto dos provetes após rotura .....	54
Figura 3.11: Relação tensão-deformação do ensaio de 2 provetes para cada um dos diferentes laminados utilizados no âmbito do programa experimental.....	55
Figura 3.12: Forma dos provetes de ensaio preconizado na norma de caracterização.....	56
Figura 3.13: Ensaio de tração pura de um provete de epóxi. ....	56
Figura 3.14: a) Configuração do ensaio laje 2600; b) esquema de montagem do ensaio .....	59
Figura 3.15: Procedimentos de aplicação do sistema MA (Teixeira, Correia, et al. 2014).....	62
Figura 3.16: Procedimentos de aplicação do sistema GA (Teixeira, Correia, et al. 2014) .....	63
Figura 3.17: Evolução da temperatura e da força instalada no laminado de CFRP para o caso do método do gradiente (GA): (a) SL50×1.4_GA; (b) SL80×1.2_GA (Teixeira, Correia, et al. 2014).....	64
Figura 4.1: Relação entre a carga total e o deslocamento a meio vão das lajes 2600 .....	68
Figura 4.2: Relação entre a carga total e o deslocamento a meio vão das lajes 2200 .....	69
Figura 4.3: Carga aplicada <i>versus</i> extensão do CFRP.....	72
Figura 4.4: Momento fletor <i>versus</i> curvatura .....	73
Figura 4.5: (a) Força vs. Largura de fendas; (b) Medição microscópica de uma fenda (Teixeira, Luís, et al. 2014).....	75
Figura 4.6: Padrão de fendilhação (a) SL80x1.4_EBR; (b) SL80x1.4_MA; (c) SL80x1.4_GA .....	76
Figura 4.7: Espaçamento entre fendas nas lajes ensaiadas (Teixeira, Luís, et al. 2014).....	76
Figura 5.1: Modelo do SECTION (J. Sena-Cruz 2013) .....	80
Figura 5.2: Modelo Constitutivo uniaxial dos varões (J. Sena-Cruz 2013) .....	81
Figura 5.3: gráfico tensão vs. Deformação do ensaio de tração direta dos varões com diferente espessura.....	82
Figura 5.4: Resposta tensão-extensão de uma amostra de betão sujeita a um carregamento de compressão uniaxial (J. Sena-Cruz 2013). ....	83
Figura 5.5: Lei do betão sujeito à compressão proposta pelo CEB-FIP Model Code 1990.....	84

Figura 5.6: Resposta tensão-deslocamento de uma amostra de betão sujeita a um carregamento de tração uniaxial (J. Sena-Cruz 2013).	86
Figura 5.7: Proposta do CEB-FIP (2010) para simular a tração uniaxial do betão usando um diagrama multi-linear (J. Sena-Cruz 2013).	87
Figura 5.8: Diagrama multi-linear utilizado no modelo NLMM203	88
Figura 5.9: Secção transversal discretizada nos diferentes elementos finitos.	88
Figura 5.10: Resultados experimentais <i>versus</i> simulações numéricas para a laje STR em função do fctm.	89
Figura 5.11: Gráficos comparativos da simulação numérica com a resposta experimental de todas as lajes com 2.6 metros de comprimento.	91
Figura 6.1: Diferentes métodos de observação das variações de temperatura através da técnica termográfica por infravermelhos ativa: <b>a)</b> método de observação por reflexão; <b>b)</b> método de observação por transmissão (Maldague, Largouët & Couturier, 1998)	96
Figura 6.2: Variação de intensidade de dois <i>pixéis</i> , sendo um representativo de uma zona defeituosa e o outro de uma zona sem defeito (W L Lai et al. 2010)	98
Figura 6.3: Variação de intensidade de um <i>pixel</i> ao longo do comprimento de um respetivo defeito.	99
Figura 6.4: preparação dos provetes para validação dos resultados obtidos. a) Aplicação dos defeitos artificiais na superfície do Betão e Laminado; b) Preparação do epóxi; c) aplicação do epóxi às superfícies a aderir; d) Colocação do laminado na superfície do betão.	101
Figura 6.5: Aplicação de energia térmica ao provete.	102
Figura 6.6: Processo de obtenção dos vídeos térmicos dentro de uma caixa envolvente.	102
Figura 6.7: Análise da temperatura ao longo do tempo; a) Variação ao longo do tempo dos diferentes defeitos e área não defeituosa; b) zona de análise do defeito de diâmetro de 50 mm	103
Figura 6.8: a) Fotografia digital do local da imagem termográfica; b) Imagem termográfica	105
Figura 6.9: Variação térmica ao longo de diferentes perfis; a) perfil vertical; b) perfil horizontal	106
Figura 6.10: Zonas de identificação da localização dos potenciais defeito	106
Figura 7.1: Programa de ensaios da presente dissertação. Entre parêntesis é apresentado o número de lajes ensaiadas de acordo com o comprimento e a técnica de reforço aplicada.	109

## ÍNDICE DE TABELAS

---

Tabela 2.1- Características principais das fibras (Juvandes 2002).....	14
Tabela 2.2: Comparação das propriedades típicas dos adesivos epoxi, betão e aço macio.(fib 2001).....	21
Tabela 2.3: Características dos sistemas de pré-esforço com FRP para aplicação <i>in situ</i> (R El-Hacha, Wight, and Green 2001). ....	38
Tabela 3.2: Resultados dos ensaios de caracterização das armaduras.....	51
Tabela 3.3: Resultado das propriedades dos laminados CFRP obtidas na caracterização .....	55
Tabela 3.4: Resultados dos ensaios de caracterização do adesivo epoxídico.....	57
Tabela 3.5: Programa experimental realizado .....	58
Tabela 4.1: Resumo campanha experimental das lajes da série 2600 .....	67
Tabela 4.2: Resumo campanha experimental das lajes da série S2200.....	68
Tabela 4.3: Variação da rigidez entre as diferentes fases exibidas pelas lajes com comprimento 2600 .....	70
Tabela 4.4: Variação da rigidez entre as diferentes fases exibidas pelas lajes com comprimento 2200 .....	71
Tabela 5.1– Modelos não lineares de materiais (J. Sena-Cruz 2013).....	81
Tabela 5.2: Comportamento aço $\varnothing 6$ e $\varnothing 8$ .....	82
Tabela 5.3: Valores dos parâmetros utilizados nas simulações numéricas .....	89
Tabela 5.4: Comparação dos valores de tensão entre as simulações com diferentes valores resistência à tração.....	90
Tabela 5.5: Comparação dos principais valores de tensão observados entre os dados experimentais e os dados simulados.....	91
Tabela 6.1: Identificação dos contrastes máximos e correspondentes instantes de tempo.....	103
Tabela 6.2: Diâmetros obtidos para cada defeito .....	104
Tabela 6.3: Área aparente e localização dos defeitos detetados.....	107



# CAPÍTULO 1

---

## INTRODUÇÃO

### 1.1 ENQUADRAMENTO

Cada vez mais existe uma necessidade de aumento de consciencialização face à forma como utilizamos os recursos que o nosso planeta nos oferece. Assim, é de extrema importância potenciar esta ideologia, assegurando uma construção mais sustentável e uma redução dos impactos de novas construções. Neste contexto verifica-se que a reabilitação tem aumentado gradualmente, tendo sido desenvolvidas várias tecnologias que asseguram segurança, conforto e estética, requisitos de qualquer edificado ao longo do seu tempo de vida útil. A nível nacional a reabilitação urbana tem vindo a ganhar crescente expressão, destacam-se os investimentos realizados em cidades históricas nomeadamente, Porto, Guimarães e Lisboa.

Em Portugal “*verificou-se nas últimas décadas um dos maiores surtos de construção a nível europeu, o que resultou em cerca de 5 milhões de casas construídas das quais pouco mais de 3,5 milhões se encontram habitadas*” (Cóias 2007). O excesso de construção conduziu à existência de um conjunto de edifícios cujo ciclo de vida está ultrapassado, sendo que muitas destas já não apresentam as condições necessárias à sua habitação e, muito provavelmente, acabarão por ser demolidas sem nunca terem sido utilizadas. Consequentemente, e aliada à crise económica que o país atravessa, a construção encontra-se estagnada. Por um lado, não há necessidade de nova construção para habitação, uma vez que as pessoas não acedem a créditos, o que impossibilita a troca de casa, por necessidades, ou familiares (aumento de família) ou de espaço requerido. Por outro lado, a construção de obras públicas, é muito escassa ou inexistente.

Em suma, a nova construção é mínima, impulsionando a reabilitação de edifícios existentes, que devido à deterioração durante a sua utilização e às intempéries, necessitam de manutenção e de beneficiação. Deste modo, é imperativo adotar medidas de reabilitação, disponibilizando-se fundos para o desenvolvimento de novas metodologias.

No domínio da reabilitação de edifícios, é necessário garantir que o edifício em análise verifique os requisitos apresentados pela regulamentação atual, garantindo o bom funcionamento estrutural, quer a nível de utilização, como de capacidade resistente.

A deformação das estruturas devido à perda de resistência mecânica, o aumento das solicitações, a possibilidade de ocorrência de cargas excecionais (cargas de impacto, incêndios,

sismos, entre outros), a existência de erros de execução durante a fase de construção, o cumprimento das estruturas antigas face aos objetivos requeridos pelas normas em vigor, assim como um deficiente comportamento em serviço, são alguns dos fatores que têm motivado o reforço de estruturas de betão armado (BA) (Ali et al. 2014; Neale, 2000).

O reforço estrutural através da utilização de polímeros reforçados com fibras, *fiber reinforced polymers*, segundo a nomenclatura inglesa (FRP's), tem ganho uma enorme popularidade nas últimas décadas muito devido ao facto de ser uma alternativa eficiente, leve e não corrosiva face a outros métodos de reabilitação (J. Sena-Cruz et al. 2010).

No domínio do reforço estrutural à flexão uma técnica destaca-se por ser normalmente a mais utilizada: a técnica *External bonded reinforcement* (EBR) consiste na colagem do reforço na forma de laminado ou manta à superfície tracionada da estrutura a ser reforçada. Normalmente, adesivos epoxídicos são usados como elemento de ligação entre o reforço e o substrato. Dentro de muitos materiais FRP comercializados, os materiais compósitos em carbono (CFRP) são os mais utilizados no reforço de estruturas de BA, uma vez que apresentam densidade baixa, boa resistência à fadiga, baixa suscetibilidade aos agentes agressivos ambientais, alta rigidez e alta resistência de tensão (CEB, 1997). Por outro lado têm a desvantagem de ter um custo muito elevado. Não obstante a isso a maioria das soluções, acaba por ser a opção mais viável a nível económico uma vez que os custos de mão-de-obra podem ser drasticamente reduzidos (Neale, 2000).

Segundo Silva (2008), investigações, observações e acompanhamento das aplicações práticas dos FRP, nomeadamente pela técnica EBR, possibilitaram a sistematização de modelos de dimensionamento, critérios de verificação de segurança e procedimentos de execução e controlo de qualidade.

Vários estudos realizados demonstraram que a carga última das estruturas reforçadas acontecia depois de ocorrer descolagem do laminado da superfície de betão, não se tirando total partido das capacidades resistentes destes materiais. Visto isto, Motavalli et al. (2011) concluíram que a capacidade resistente elevada característica destes materiais, não estava a ser explorada, uma vez que apenas 20 a 30% da capacidade do material estava a ser utilizada.

De forma a conseguir explorar de forma eficiente as elevadas capacidades resistentes deste tipo de materiais, em determinadas aplicações têm vindo a ser utilizados no reforço de estruturas de BA, laminados pré esforçados. Estas combinam os benefícios dos sistemas com laminados FRP colados passivamente, com as vantagens associadas ao pré-esforço exterior.

Aplicando pré-esforço ao laminado, tira-se um maior partido da sua resistência à tração, conseguindo-se vantagens como, a redução da deflexão, dos efeitos das cargas permanentes, da largura das fendas, a retardação do início da fendilhação assim como um alívio de tensão nas armaduras, o aumento da resistência à fadiga, o aumento da eficiência dos materiais utilizados (betão, aço, FRP), a inibição do descolamento prematuro, o incremento da carga de colapso, aumento da resistência ao corte, entre outras (El-Hacha et al., 2001; Michels et al., 2013). Isto verifica-se devido à tensão axial imposta ao nível do laminado resultado do pré-esforço aplicado.

O sistema de ancoragem aplicado nas extremidades do compósito desempenha um papel fundamental no desempenho de todo o sistema de reforço pré-esforçado. As tensões de corte desenvolvidas no interface betão / FRP nas extremidades é um problema associado ao uso de técnicas de pré-esforço (Kotynia et al., 2011). A solução é conseguida através de sistemas apropriados de ancoragem. Apesar de existirem vários sistemas de ancoragem disponíveis no mercado (Michels et al, 2013), apenas dois sistemas da *S & P Clever Reinforcement* têm vindo a ser usados de forma mais recorrente: o sistema *Mechanical Anchorage* (MA) e o sistema *Gradient Anchorage* (GA).

## 1.2 OBJECTIVOS E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A aplicação de compósitos na construção tem vindo a mostrar diversas qualidades que os têm tornado em materiais de eleição no reforço e reparação de estruturas de BA. O aproveitamento de todas as capacidades destes materiais têm sido o grande desafio que tem levado ao desenvolvimento de novas técnicas de reforço com compósitos. A presente dissertação foi desenvolvida de forma a dar um contributo no conhecimento destas novas técnicas e está inserida no projeto de investigação FRPreDur (PTDC/ECM-EST/2424/2012), cujo organigrama se apresenta na Figura 1.1.

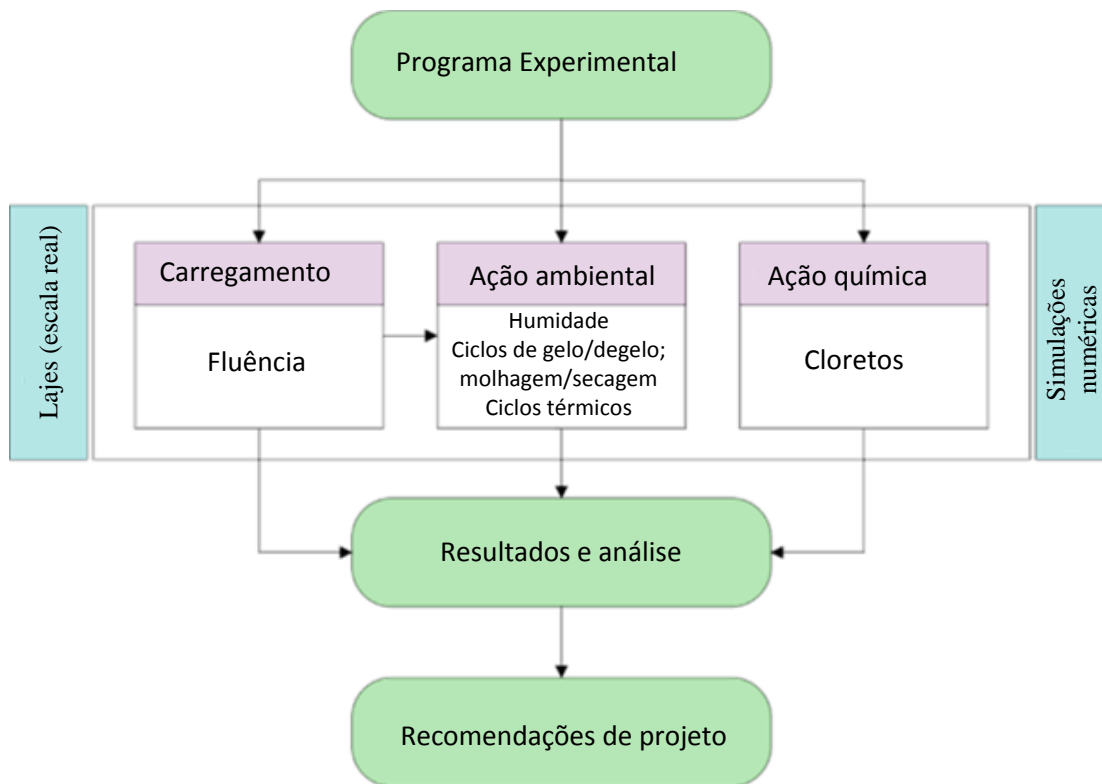


Figura 1.1: Organograma do Projeto FRPreDur

O programa experimental visa o estudo de lajes de BA reforçadas à flexão com laminados de CFRP pré-esforçados submetidas a um envelhecimento acelerado, com diferentes efeitos de carregamento (fluência) e ações ambientais (humidade, ação térmica, cloretos). O projeto engloba duas partes em estudo, os resultados obtidos experimentalmente e os resultados obtidos numericamente através de simulações dos resultados obtidos experimentalmente, de forma a se prever o tempo de vida útil de estruturas reforçadas de acordo com a técnica EBR. De forma a se poder analisar o efeito dos diferentes agentes ambientais nas lajes envelhecidas foi necessário desenvolver um programa de ensaios constituído por lajes com as mesmas características. De modo a determinar a configuração de reforço adequada foi realizado um programa de ensaios preliminar, que se encontra inserido no âmbito da presente dissertação.

Assim, os principais objetivos da presente dissertação são os seguintes:

- Investigar dois sistemas comerciais de ancoragem de laminados pré-esforçados da S&P Clever Reinforcement: o sistema de ancoragem metálica (MA) com elementos metálicos fixos na extremidade do FRP e o método do gradiente (GA) que utiliza um sistema de cura acelerada do epóxi;
- Avaliar o comportamento dos sistemas MA e GA em condições de serviço e à rotura;



- Adicionalmente, investigar a influência da geometria do laminado e do tipo de técnica de reforço (pré-esforçado e não-pré-esforçado);
- Simular numericamente os ensaios de rotura comparando os resultados obtidos experimentalmente com os obtidos numericamente;
- Avaliar a qualidade do reforço aplicado por intermédio de ensaios de controlo de qualidade.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No Capítulo 1 é feito um enquadramento do tema da dissertação e são apresentados objetivos da presente dissertação.

No Capítulo 2 apresenta-se uma pesquisa bibliográfica caracterizando os principais constituintes de compósito FRP, bem como a comparação, as principais técnicas de reforço. É apresentado uma análise do comportamento mecânico de vigas reforçadas à flexão com CFRP, descrevendo os principais modos de ruína presentes neste tipo de reforço. O capítulo é finalizado com a apresentação de sistemas de reforço com laminados pré esforçados bem como a descrição de diferentes métodos de aplicação. São ainda introduzidos os dois métodos de ancoragem (necessários a sistemas pré-esforçados).

No Capítulo 3 apresentam-se os materiais usados e suas características, bem como a geometria das lajes utilizadas, a metodologia de reforço das lajes com CFRP's pré-esforçados e o programa de ensaios experimentais realizado.

No Capítulo 4 são apresentados e analisados os resultados experimentais dos ensaios à rotura das lajes presentes no programa de ensaios.

No Capítulo 5 são realizadas várias simulações numéricas de modo a simular o comportamento experimental das lajes nos ensaios de rotura. Para tal foi utilizado o programa SECTION. Seguidamente, é analisada a qualidade das simulações efetuadas através da comparação destes resultados numéricos com os resultados experimentais.

No capítulo 6 foram efetuados ensaios termográficos num conjunto de lajes, de forma a verificar a qualidade da ligação do reforço. É apresentado também a devida validação dos dados obtidos através da análise de provetes com defeitos artificialmente embebidos.

No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões gerais do trabalho e propostas de trabalhos futuros.



## CAPÍTULO 2

---

### REFORÇO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO COM FRP: BREVE RESENHA

#### 2.1 INTRODUÇÃO

No contexto do reforço de estruturas, a primeira fase passa pela escolha de uma solução, de entre várias existentes, sendo a solução escolhida dependente de uma avaliação económica de todas as alternativas possíveis. Esta avaliação consiste numa estimativa dos custos totais que inclui, também os custos ao longo de toda a sua vida de utilização. Os custos totais envolvem, assim, os custos associados à futura manutenção, bem como todos os custos que resultam dos trabalhos a serem realizados, diretos e indiretos, como por exemplo, custos sociais (isolamento de uma população, corte de vias de acesso) e custos económicos (paragem de produção de uma industria), (Hutchinson and Hollaway 1999).

Na reabilitação estrutural, a utilização de compósitos FRP no reforço estrutural à flexão é normalmente comparada com a colagem de chapas de aço, uma vez que ambas as técnicas têm várias características em comum (Bakis et al. 2002; You et al., 2012). No entanto devido à versatilidade que os FRP oferecem, este não deve ser encarado como um simples melhoramento face ao reforço com recurso às chapas de aço (a nível de redução de peso, de aumento de rigidez, de aumento de carga de colapso/momento resistente ultimo), uma vez que novas soluções se tornaram possíveis com o aparecimento dos compósitos, nomeadamente técnicas que permitem a aplicação de pré-esforço (Meier, 1995). As vantagens associadas à utilização dos compósitos FRP são as seguintes (Hutchinson and Hollaway, 1999):

- Resistência: os compósitos FRP podem ser constituídos com diversos componentes. Por conseguinte existe uma ampla gama de possíveis constituintes para um propósito particular, podendo variar no tipo e na proporção da fibra escolhida. Assim, a sua capacidade resistente máxima varia, sendo improvável que a capacidade máxima do laminado seja inferior a três vezes a capacidade máxima verificada no reforço com chapas de aço de igual secção transversal.
- Peso: a densidade dos compósitos é apenas cerca de 20% da densidade do aço. O peso com recurso a reforço por compósito pode ser menos de 10% do peso de um reforço com recurso a chapas de aço com a mesma capacidade resistente devido ao facto de o aço ter uma tensão de

cedência entre os 400 e os 500 MPa e os compósitos de carbono apresentarem uma tensão de rotura superiores a 3000 MPa. Para além dos custos de transporte, a maior redução de custos verifica-se na própria instalação, uma vez que não é necessário sistemas de suporte para mover e fixar os laminados durante a sua instalação (Wight, Green, and Erki 2001). O adesivo por si só oferece suporte ao laminado até que este (o adesivo) esteja totalmente curado. Por outro lado, a aplicação do reforço convencional com chapas de aço envolve elevados custos de mão-de-obra.

- Transporte: o peso dos compósitos é bastante reduzido. Um laminado com um comprimento de 20m pode ser transportado por apenas uma pessoa. Outro aspeto bastante interessante, é que alguns laminados podem ser curvados e dispostos numa bobine com apenas 1.5m de diâmetro, facilitando o seu transporte em qualquer tipo de veículo sem a necessidade da utilização de transportes de grande porte como camiões. A sua flexibilidade possibilita ainda o reforço de certas estruturas em sítios mais confinados.

- Versatilidade de *design*: o comprimento das chapas de aço é limitado, devido ao seu peso e dificuldades de manuseamento. A soldagem *in situ* não é possível devido ao dano provocado aos adesivos, havendo por isso necessidade da fixação de chapas adjacentes. Os laminados FRP apresentam-se como uma boa solução para este problema uma vez que têm um comprimento “ilimitado”, podem ser fixados em camadas até se atingir o nível de reforço desejado e o facto de terem uma espessura tão reduzida que possibilita a sua fixação em mais do que uma direção, variando apenas a espessura do adesivo.

- Redução do material de fixação: os laminados FRP são consideravelmente mais finos do que as chapas de aço com capacidade resistente equivalente. A espessura global de todo o esquema de reforço é assim diminuída, resultando numa melhoria estética considerável.

- Durabilidade: no reforço com chapas de aço há a possibilidade de ocorrência de corrosão na face colada à estrutura de BA (desde que a face exposta-não colada- seja protegida da corrosão), particularmente se a face de betão apresentar fendas ou estiver contaminada com cloretos, comprometendo a aderência a longo prazo. Este tipo de deterioração não se verifica nos compósitos.

- Maior resistência ao fogo: os laminados FRP são fracos condutores de calor comparativamente com o aço, reduzindo assim os efeitos nefastos do fogo.

- Redução do dano causado pelo efeito gelo/degelo: existe um risco teórico de haver a presença de água na face interna do reforço que é anulado se este for devidamente instalado. Na prática e até agora foi verificado que não é verdadeiramente um problema, no entanto se realmente se verificar a presença de água nestas camadas as propriedades isolantes dos materiais compósitos reduziriam o risco de destacamento do betão devido à ação gelo/degelo. Refira-se que ainda que a perda de aderência no caso dos compósitos é facilmente detetada através de análises térmicas com infravermelhos, uma vez que apresentam um comportamento térmico distinto quando comparado com as zonas perfeitamente aderidas. No reforço com chapas de aço tal análise não seria possível, o que dificultaria a deteção de zonas sem aderência.

- Manutenção do sistema de reforço: o reforço metálico necessita de manutenção, que se pode traduzir em custos devido a interrupções de trânsito (em obras de reforço em viadutos, por exemplo), custos derivados ao difícil acesso do reforço, bem como elevados custos de mão-de-obra. Os laminados FRP já não necessitam de tais manutenções (exceto em caso de acidente) reduzindo assim os custos totais da aplicação do reforço em relação aos custos iniciais.

- Reduzido tempo de aplicação: muitas das vantagens práticas acima descritas possibilitam que os laminados FRP sejam aplicados num período de tempo bastante diminuto quando comparado com o reforço através das chapas de aço. Assim como a redução dos custos contratuais, os custos associados a atrasos de trânsito ou perdas de produção são também minimizados, quando se toma como por exemplo o reforço de uma ponte rodoviária.

- Capacidade de aplicação de pré-esforço: a capacidade o uso de pré-esforço nos compósitos possibilita uma vasta gama de aplicações. Assim, o reforço longitudinal por FRP pré-esforçados possibilita um melhor comportamento estrutural traduzido em termos de resistência a esforços de corte e de flexão. Além disso a formação de fendas é mitigada otimizando assim o estado limite de serviço de fissuração.(Meier, 1996)

Apesar das imensas vantagens que os FRP apresentam, também existem potenciais desvantagens que de seguida se enumeram (Hutchinson and Hollaway 1999):

- Custo: os compósitos apresentam um custo mais elevado que as chapas de aço de equivalente capacidade de carga. No entanto, é provável que a diferença entre os dois materiais venha a ser reduzida com o aumento de produção de compósitos devido ao aumento de produtores (Meier, 1996). A comparação económica entre sistemas alternativos de reforço é baseada não só nos custos do material, mas também em todos os custos associados à aplicação do mesmo. Por

consequente, conclui-se que as soluções de reforço através de compósitos FRP são as mais económicas.

- Danos: os laminados FRP são muito mais suscetíveis a serem danificados que os reforços metálicos. Nas zonas mais vulneráveis com acesso público o risco pode ser diminuído, através da aplicação de uma proteção rígida envolvente ao laminado. Felizmente, caso o laminado for danificado é possível ser facilmente reparado, situação que não se verifica no reforço através de chapas de aço. Estas podem descolar ao longo de uma grande área, o que significa que todo o sistema necessita de ser substituído. Pelo contrário o dano provocado nos compósitos é mais provável que seja local, uma vez que tem uma espessura muito reduzida e é consideravelmente mais flexível. A solução requer a remoção da parte danificada e posteriormente a colagem de uma nova camada de laminado com espessura apropriada.

### 2.1.1 CONSTITUIÇÃO DOS FRP

Os FRP são constituídos por dois materiais: (i) a matriz polimérica e (ii) as fibras. Estas últimas apresentam grande resistência e elevado módulo de elasticidade. A matriz tem características sinérgicas e apresenta um comportamento muito dúctil. A matriz tem ainda a finalidade de envolver por completo as fibras e assegurar uma boa transferência de tensões entre todo o sistema (Balaguru et al. 2008). Na Figura 2.1. e Figura 2.2, representa-se a relação entre as tensões e as deformações para os dois materiais e é possível comprovar as suas diferenças em termos de rigidez, resistência e ductilidade.

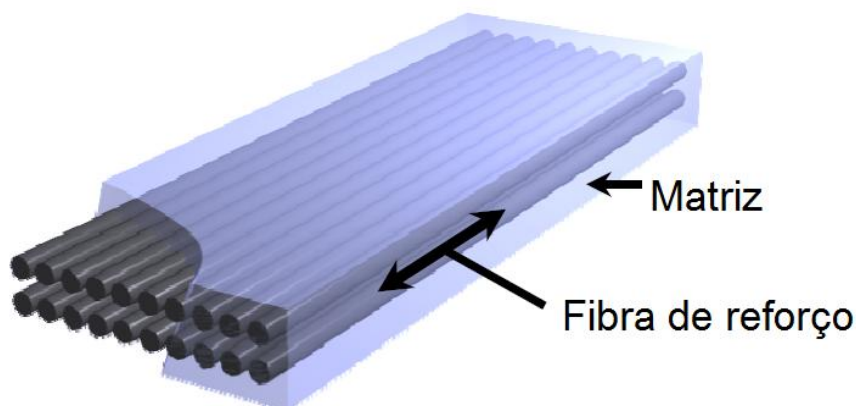


Figura 2.1: Esquema ilustrativo da disposição das fibras no interior da matriz (ISIS 2006)

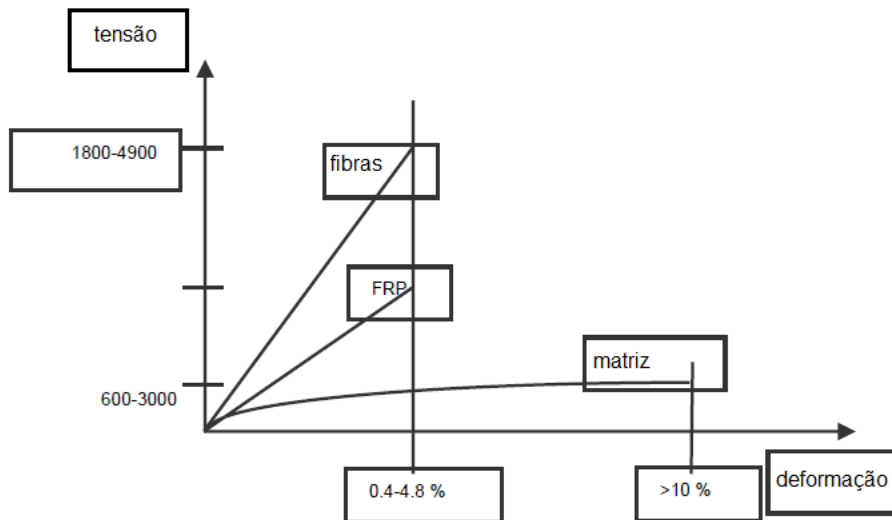


Figura 2.2: Relação tensão-deformação das fibras de reforço e da matriz (ISIS 2007)

Conjugando estes dois materiais obtemos a família dos *Fiber Reinforced Polymers* (FRP) que apresentam excelentes propriedades mecânicas e físicas comparativamente a outros materiais convencionais, tais como o aço e o alumínio (Juvandes 2002). A comparação destas características encontra-se representada na Figura 2.3.

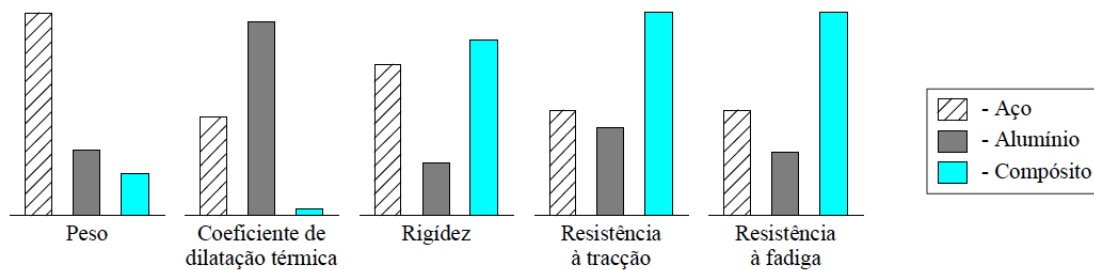


Figura 2.3: Comparação de algumas propriedades entre o aço, alumínio e o compósito (Juvandes 2002).

Estes materiais têm beneficiado de uma certa popularidade, uma vez que apresentam elevada resistência e rigidez, baixo peso específico, excelente resistência à agressividade ambiental, assim como a possibilidade em admitir propriedades direcionais a nível estrutural, elétrico e magnético variáveis de acordo com a conveniência (Juvandes 2002).

### 2.1.2 MATRIZ POLIMÉRICA

Apesar de as fibras serem as principais responsáveis pela resposta do compósito às solicitações mecânicas, a matriz polimérica, desempenha funções igualmente importantes, nomeadamente (Firmo 2010; Hutchinson and Hollaway 1999):

- Aglutinar as fibras em conjunto;
- Proteger as fibras da abrasão e das agressões ambientais;
- Transferir esforços entre fibras;
- Ser quimicamente, termicamente e mecanicamente compatível com as fibras;
- As propriedades da matriz controlam as propriedades transversais no caso de compósitos unidirecionais.

A matriz tem uma grande influência nas propriedades mecânicas do compósito. A seleção da matriz deve ser criteriosa e devidamente analisada face às suas características físicas e químicas. Salienta-se que a matriz deve apresentar uma baixa densidade e, sempre que possível, menor que a da fibra utilizada, reduzindo assim o peso geral do compósito (fib 2001; ISIS 2006).

Tipicamente, as resinas utilizadas com fibras de reforço de alta performance são as resinas de poliésteres, de vinil e de epóxi (Hutchinson and Hollaway 1999). Os poliésteres apresentam um baixo custo de produção, baixa viscosidade, baixo tempo de cura e facilidade de aplicação fazendo com que sejam os polímeros mais utilizados na produção de componentes FRP (Rodrigues 2009). As resinas de vinil apresentam inúmeras qualidades como resistência aos ácidos fortes e alcalis, reduzida absorção de humidade e retração quando comparada com os poliésteres, baixa viscosidade e baixo tempo de cura. Além disso apresentam também um custo pouco superior ao dos poliésteres, uma retração volumétrica entre 5-10% e uma capacidade resistente média comparativamente as resinas epóxi (Rodrigues 2009). Os epóxios apresentam normalmente propriedades mecânicas superiores quando comparada com as outras resinas apresentadas. Possuem uma durabilidade notória, boa capacidade de cura à temperatura ambiente, alta resistência a esforços de corte, boa estabilidade dimensional, apresentam boas características quando sujeito a temperaturas altas e elevada resistência a produtos químicos (exceto a ácidos). Tem como desvantagens um custo consideravelmente superior ao das outras resinas e o facto de terem um tempo de cura longo (fib, 2001).



### 2.1.3 FIBRAS

As fibras são responsáveis pela resposta mecânica do reforço face às solicitações. Tal facto é devido à propriedade mais importante das fibras, o seu módulo de elasticidade. Estas devem apresentar uma rigidez significativamente superior à da matriz, para que suportem a maioria da tensão atuante proveniente dos esforços solicitantes (Balaguru et al. 2008; Hutchinson and Hollaway 1999). Dependendo da solução de reforço a definir terá de haver uma seleção prévia do tipo de fibra a utilizar, e respetivos níveis de concentração, comprimento e do modo de disposição na própria matriz. Pela análise da Figura 2.4, na direção principal das fibras (direção longitudinal), a resistência à tração e o respetivo módulo de elasticidade são máximos, diminuindo o seu valor com o afastamento do ângulo em análise. As fibras têm a vantagem de exibirem um comportamento perfeitamente elástico até à rotura sem patamar de cedência e deformação plástica características do aço, (Hutchinson and Hollaway 1999).

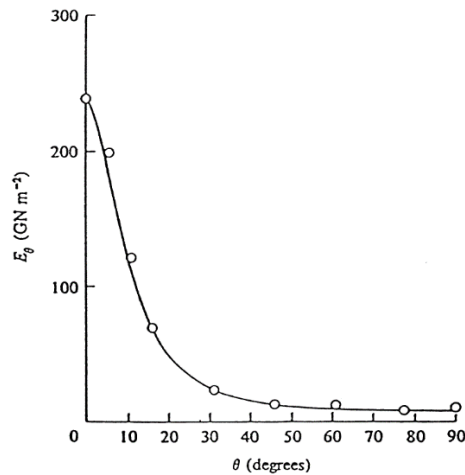


Figura 2.4: Variação teórica do módulo de elasticidade com o aumento do ângulo relativo à direção principal das fibras (Hutchinson and Hollaway 1999).

As principais fibras utilizadas no reforço estrutural são o vidro (G da nomenclatura inglesa *glass*), o carbono (C da nomenclatura inglesa *carbon*), a poliamida aromática (aramida (A da nomenclatura inglesa *aramid*) e o Kevlar (K da nomenclatura inglesa *kevlar*). Mais recentemente têm vindo a ser utilizadas fibras de basaltos (B da nomenclatura inglesa *basalt*). A Figura 2.5 mostra uma comparação de comportamento entre todos os compósitos acima enumerados.

Os compósitos FRP provêm da junção de fibras de reforço com a matriz (resina termoendurecível) e também com materiais de enchimento (designados também por “*fillers*”). Aplicando as principais fibras aos compósitos obtemos os seguintes compósitos:

GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*);  
 CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*);  
 AFRP (*Aramid Fiber Reinforced Polymer*).

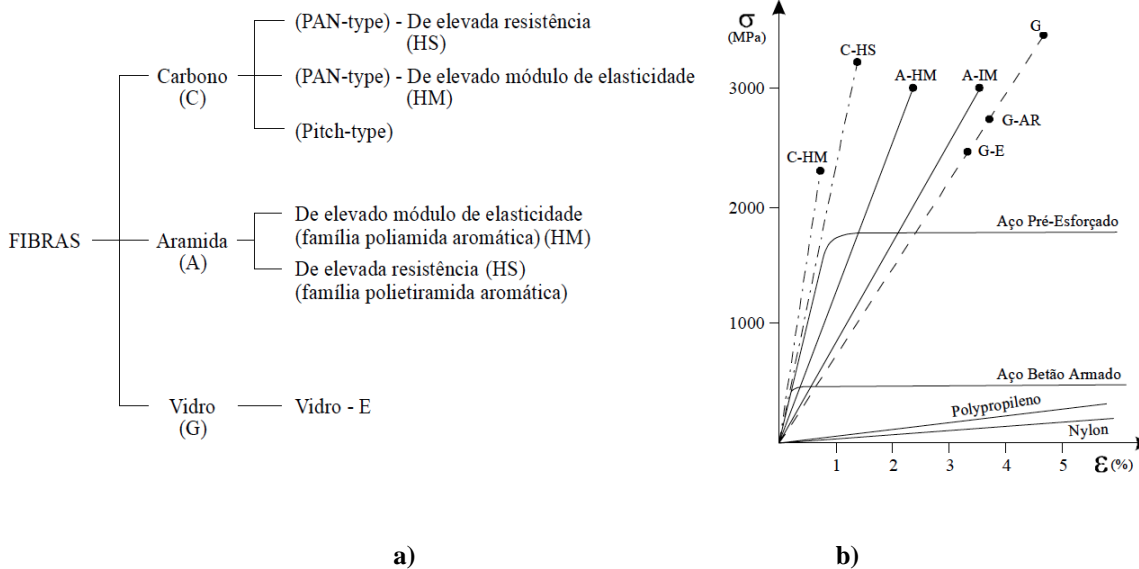


Figura 2.5: a) Classificação das fibras; b) Comportamento à tração de fibras e metais (Juvandes 2002).

A Tabela 2.1 apresenta os valores dos principais parâmetros dos principais compósitos retirados na indústria da reabilitação estrutural.

Tabela 2.1- Características principais das fibras (Juvandes 2002).

Tipo de fibras		Resistência Tração (MPa)	Módulo Elasticidade (GPa)	Alongamento último (%)	Peso Específico
Carbono (C)	Elevada resistência	3430-4900	230-240	1.5-2.1	1.8
	Elevado módulo Elasticidade	2940-4600	392-640	0.45-1.2	1.8-2.1
Aramida (A)	Elevado módulo Elasticidade	2900	111	2.4	1.45
	Elevada resistência	3500	74	4.6	1.39
Vidro (G)	Vidro-E	3500	74	4.7	2.6

#### 2.1.4 CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP)

Os compósitos obtidos pela junção das fibras de carbono (C) e da matriz polimérica dependem essencialmente do material constituinte, do teor das fibras principais de reforço e sua disposição, do processo de fabrico e da interação dos materiais constituintes (Hutchinson and Hollaway 1999).

Os compósitos com fibras de carbono, aramida e vidro podem ser aplicados em reforços estruturais. Nas últimas décadas, verificou-se um aumento na utilização de fibras de vidro, devido ao facto de ser a fibra mais produzida e por conseguinte a mais económica. No entanto, é um material que apresenta problemas de durabilidade especialmente quando aplicado em estruturas de BA.

As fibras de carbono, apesar de serem menos económicas, apresentam determinadas vantagens que outros tipos de fibras não possuem, tais como, o facto de admitirem contacto direto com superfícies de betão, maior módulo de elasticidade e resistência, assim como maior resistência à humidade, a solventes, a soluções básicas e ácidos fracos (Balaguru et al. 2008).

Quando comparado com os outros compósitos, os compósitos à base de carbono (CFRP) apresentam maior resistência à tração e à compressão e maior módulo de elasticidade longitudinal, por exemplo, laminados fabricados com fibras de vidro têm de ser três vezes mais espessos que um laminado de carbono para conseguir igualar o nível de resistência e rigidez. Apresentam também bom comportamento à fadiga, boa resistência química, baixa densidade, boa estabilidade dimensional (coeficiente de expansão térmica baixo) e boa resistência térmica, química e aos agentes ambientais. São idealmente aplicadas em estruturas sensíveis a deformações e a aumento de peso (ISIS 2006).

Apresentam como desvantagens a fraca resistência à abrasão, sensibilidade ao choque, quando em contacto com outros metais sofre corrosão do tipo galvânico e sofre ataque por parte do oxigénio quando submetido a temperaturas superiores a 400°C (Silva 2013).

O processo de produção das fibras de carbono (C) é a pirólise controlada, resultando fibras que apresentam módulos de elasticidade muito variados, o que levou a criar uma classificação com base no mesmo (Rodrigues 2009):

- Padrão, 250 – 300 GPa;
- Intermédia, 300 – 350 GPa;
- Alta, 350 – 550 GPa;
- Ultra-alta, 550 – 1000 GPa.

Os materiais compósitos de CFRP utilizados no reforço de estruturas existentes surgem nas seguintes formas: laminados, mantas, tecidos, varões, fios e cordões. Deste modo é possível aplicar estes materiais em diferentes tipos de reforço tais como, reforço à flexão de lajes, vigas e pilares, reforço ao corte de vigas e confinamento de pilares, através de distintas técnicas, como ilustrado na Figura 2.6.

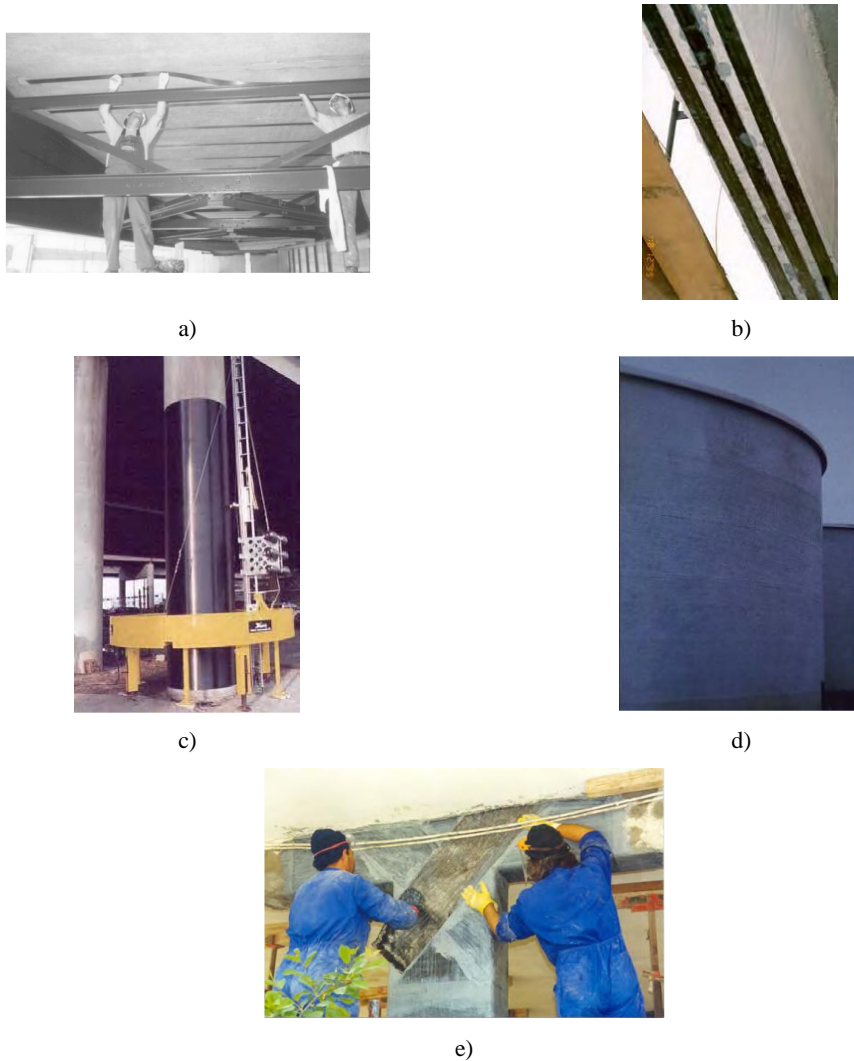


Figura 2.6: a) reforço à flexão de uma laje; b) reforço à flexão de uma viga; c) reforço ao corte e confinamento de um pilar de betão; d) confinamento de um tanque de betão; e) reforço ao corte de uma zona de nó viga/pilar (fib 2001)

Das soluções de material de reforço atrás mencionadas a mais utilizada no reforço à flexão são os compósitos em forma de laminado. Estes são o resultado do envolvimento de um conjunto de fibras por uma resina termo-endurecível, que posteriormente, são consolidadas através de um processo de pultrusão, cujo principal objetivo é controlar a espessura e a largura

do compósito. A espessura do laminado varia entre 1 mm e 2.4 mm, para aplicações correntes no reforço estrutural. As características mecânicas baseiam-se na área bruta da secção transversal da lâmina (Hutchinson and Hollaway 1999)

### 2.1.5 PROCESSO DE PRODUÇÃO

A pultrusão é um processo contínuo que permite a produção de perfis retos com secção constante (Bakis et al. 2002; ISIS 2007). O processo inicia-se com a impregnação das fibras com resina, através de um dispositivo, normalmente denominado de banho. De seguida, as fibras impregnadas com resina passam através de uma forma de aço aquecida com as dimensões da secção transversal desejada, normalmente designada por fieira. A fieira de aço é previamente aquecida até a uma temperatura de cerca de 150 °C, fazendo com que a resina reaja e cure. Quando o compósito sai da fieira este apresenta já um elevado estado de cura. O processo de produção está esquematicamente ilustrado na Figura 2.7(a). A resina deve ser altamente reativa para que a cura se realize no tempo estipulado. A velocidade do processo, a temperatura da forma e a reatividade da resina são os parâmetros que definem a qualidade do compósito, devendo ser balanceados de modo a obter um produto com as características desejadas. Normalmente, é adicionado um agente desmoldante às resinas. Este durante a cura migra até à superfície, prevenindo que o FRP cole à superfície da forma. Como o processo é de cura a temperaturas elevadas não há a necessidade da utilização de catalisadores (Hutchinson and Hollaway 1999).

Podem ser desenvolvidos laminados com variadas configurações. No entanto o processo de pultrusão é usualmente utilizado para o desenvolvimento de reforços unidireccionais, uma vez que é o processo que oferece maiores valores de resistência e rigidez na direcção axial do perfil, é o mais económico, mais rápido e eficiente (You et al., 2012).

Após todo este processo são produzidos laminados com cerca de 65% de volume de fibra com disposição unidirecional. Na Figura 2.7(b) apresenta-se um compósito CFRP com o aspeto convencional denominado de lâmina ou laminado, cuja disposição interna está ilustrada na Figura 2.7(c). Normalmente os laminados são produzidos com elevado comprimento, sendo posteriormente armazenados sob a forma de rolos (Figura 2.7(d)) (Hutchinson and Hollaway 1999).

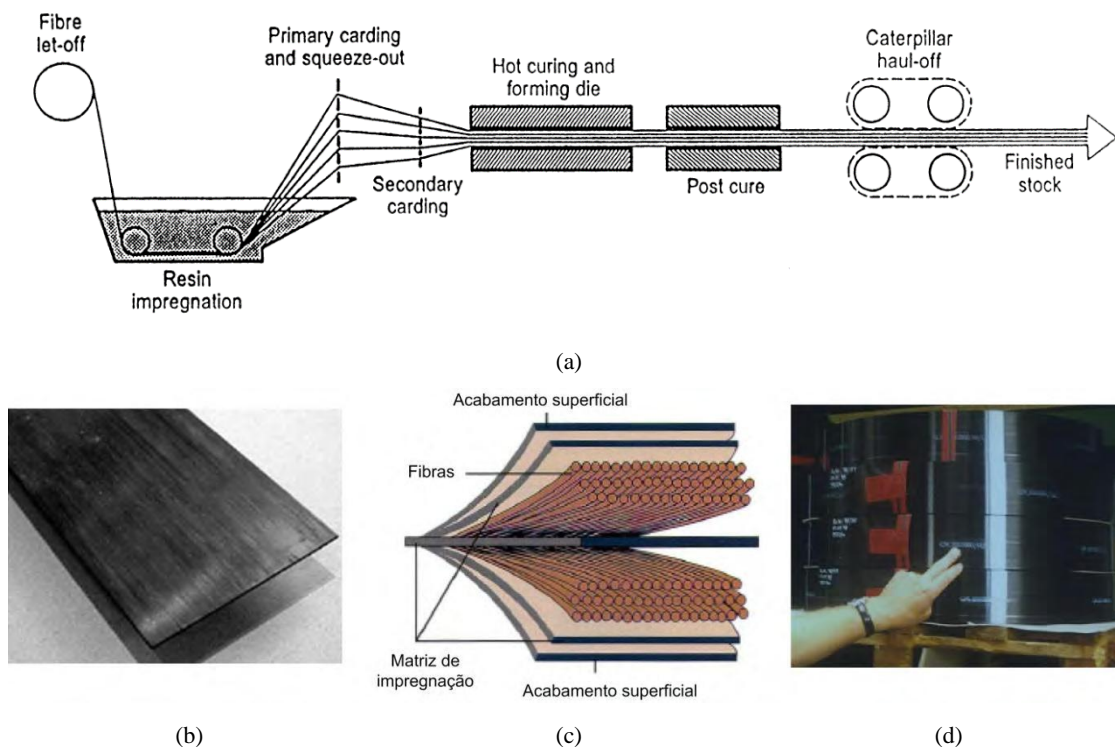


Figura 2.7: (a) processo de fabrico de compósitos CFRP por pultrusão; (b) Aspeto final dos laminados; (c) Disposição dos materiais constituintes dos laminados; (d) laminados armazenados em rolos. (Firmo 2010)

## 2.2 ADESIVOS

O principal propósito dos adesivos é assegurar uma colagem continua entre o FRP e a superfície de betão do elemento estrutural a reforçar. Esta colagem tem de assegurar uma boa transferência de tensões tangenciais entre as faces do betão e o laminado (Kang et al. 2012). O adesivo mais utilizado é o epóxi, que é o resultado de uma mistura de resina epóxi (polímero) com um endurecedor, podendo ou não conter outros aditivos.

Os epóxios representam uma classe de adesivos bastante importantes e estão disponíveis no mercado desde os anos 40 do século passado. Os adesivos de epóxi podem ser formulados em diversas formas proporcionando uma vasta gama de características práticas e propriedades mecânicas necessárias às diferentes aplicações (Hutchinson and Hollaway 1999). Foi demonstrado que um adesivo constituído por duas partes de epóxi e uma parte de endurecedor à base de poliamida é o que melhor se adequa nas diferentes aplicações de reforço de estruturas. Mays e Hutchinson (1988,1992) identificaram os principais requisitos de aderência das chapas metálicas à superfície de betão, requisitos esses que são similares à aplicação de compósitos no reforço de estruturas de BA.

Resumidamente, os requisitos são os seguintes (Hutchinson and Hollaway 1999):

- Aderência adequada entre os materiais envolvidos (FRP/betão neste caso);
- Duas partes de resina epóxi para uma parte de endurecedor de base de poliamida de forma a apresentar uma boa resistência à humidade e à deformação;
- Temperatura de transição vítrea do adesivo ( $T_g$ ) ronda os 60 °C;
- Para uma temperatura igual a 20 °C, o adesivo deve apresentar um módulo de elasticidade (E) compreendido entre 2-10 GPa e uma resistência mínima ao corte igual a 18 MPa;
- Apresentar uma boa trabalhabilidade, que permita preencher por completo as superfícies aplicadas, aplicações em superfícies na vertical e em superfícies voltadas para baixo;
- Não devem ser sensíveis a betões de natureza alcalina.

As formulações comerciais são, em geral, bastante complexas e envolvem diversos componentes. Um tipo de endurecedor é adicionado à resina, juntamente com fillers, plastificantes, diluentes, antioxidantes entre outros materiais (aditivos). A escolha do endurecedor depende do tipo de resina. O produto final pode ainda apresentar uma cura à temperatura ambiente ou a altas temperaturas, dependendo da finalidade do mesmo (Hutchinson and Hollaway 1999). A mistura da resina inicial com uma variedade de diferentes materiais potencia a existência de várias características finais do adesivo epóxi.

Uma desvantagem de uma resina resultante de muitos aditivos reside no facto do seu preço final ser bastante elevado. Por outro lado, este tipo de adesivos apresenta numerosas vantagens, nomeadamente (fib, 2001):

- Alta atividade superficial e boas propriedades de impregnação para várias bases;
- Podem ser formulados de maneira a terem um grande *open-time*;
- Cura com alto esforço de coesão;
- Pode ser misturado com a inclusão de uma fase dispersa de borracha;
- Baixa retração em comparação com poliésteres, acrílicos e vinis;
- Baixa fluência;
- Pode ser fabricado com características tixotrópicas para aplicação em superfícies verticais;
- Tem a capacidade de acomodar superfícies de colagem irregulares ou espessas.

### 2.2.1 PROPRIEDADES DOS ADESIVOS

No momento da escolha do adesivo é imperativo avaliar as diferentes fases (mistura, aplicação e cura) bem como as propriedades no seu estado final, uma vez que ditarão as propriedades da ligação do reforço.

Cronologicamente as propriedades que os adesivos devem apresentar são (Hutchinson and Hollaway 1999):

- Componentes não misturados – tempo de validade;
- Mistura inicial – viscosidade, tempo de vida útil, *wetting ability*, *joint open time*;
- Tempo de cura – rácio de desenvolvimento de força;
- Endurecido – características de força e tensão/extensão, resistência à fendilhação, temperatura, fadiga, fluência e à humidade.

O tempo de validade é o período de tempo em que os componentes podem ser armazenados sem sofrerem uma deterioração significativa. A maior parte dos materiais têm um tempo de validade máximo de um ano podendo estender-se caso o armazenamento dos componentes seja mantido a uma temperatura de 5 °C.

A viscosidade dos adesivos depende da temperatura ambiente. Assim a variação de temperatura tem uma forte influência na trabalhabilidade, na qualidade de aplicação e na capacidade de humedificação das superfícies a aderir. A propriedade de tixotropia visa humedecer o substrato de BA durante o espalhamento do material. Em ambientes de temperaturas relativamente baixas, existem formulações epoxídicas com uma viscosidade de forma a se conseguir uma aplicação apropriada.

O tempo de vida útil de um adesivo (*pot life*) é o período de tempo disponível para a aplicação do adesivo após este ter sido formulado. A variação desta janela temporal é condicionada pela reatividade do próprio adesivo, do traço em volume da mistura e da temperatura ambiente. O tempo de aplicação aumenta para baixas temperaturas e encurta para altas. Denote-se que a reação química é exotérmica e uma grande parte do volume da mistura pode apresentar temperaturas bastante elevadas. Assim, devido a todos os condicionantes o tempo de vida útil disponível pode ter uma duração até 60 minutos.

O *wetting ability* é a capacidade “humidificante” num adesivo. É fundamental para se obter uma boa aderência entre substrato e o adesivo. Esta capacidade dos adesivos desaparece no fim do tempo de vida útil do mesmo.



O *joint open time* é o intervalo de tempo que tem início no momento de aplicação do adesivo ao substrato de betão e do FRP, representando o limite de tempo em que o FRP deve ser aplicado na superfície de betão, para que não haja perda de qualidade do adesivo escolhido. Este limite de tempo varia em função da própria reação de endurecimento e do ambiente envolvente. O tempo disponível para a aplicação do reforço é cerca de 30 minutos.

A taxa de força desenvolvida ao longo da cura é caracterizada pelo tempo de cura, o tipo de adesivo e a temperatura ambiente como foi dito anteriormente. A maioria das formulações epoxídicas de cura a frio precisa de 6 a 12 horas para se atingir um grau satisfatório de resistência, necessitando a cura total de cerca de 24 ou mais horas. As propriedades típicas dos adesivos epoxídicos de cura a frio podem ser encontradas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Comparação das propriedades típicas dos adesivos epoxi, betão e aço macio.(fib 2001)

Propriedades (a 20°C)	Epóxi	Betão	Aço macio
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	1100-1700	2350	7800
Módulo de Young (GPa)	0,5-0,2	25-45	200-210
Módulo de distorção (GPa)	0,2-8	0,2	0,3
Coefficiente de Poisson	0,3-0,4	0,2	0,3
Resistência à tração (MPa)	9-30	1-5	200-600
Resistência ao corte (MPa)	10-30	2-5	200-600
Resistência à compressão (MPa)	55-110	25-150	200-600
Deformação na rotura por tração (%)	0,5-5	0,015	25
Energia de rotura aproximada (jm <sup>-2</sup> )	200-1000	100	10 <sup>5</sup> - 10 <sup>6</sup>
Coefficiente de expansão térmica (10 <sup>-6</sup> /°C)	25-100	11-13	10 - 15
Temperatura de transição vítrea (°C)	45-80	-	-

### 2.2.2 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS

As propriedades do adesivo são normalmente consequência da sua estrutura interna. Uma comparação do comportamento das relações de tensão vs. extensão de diferentes formulações para os adesivos é apresentada na Figura 2.8.

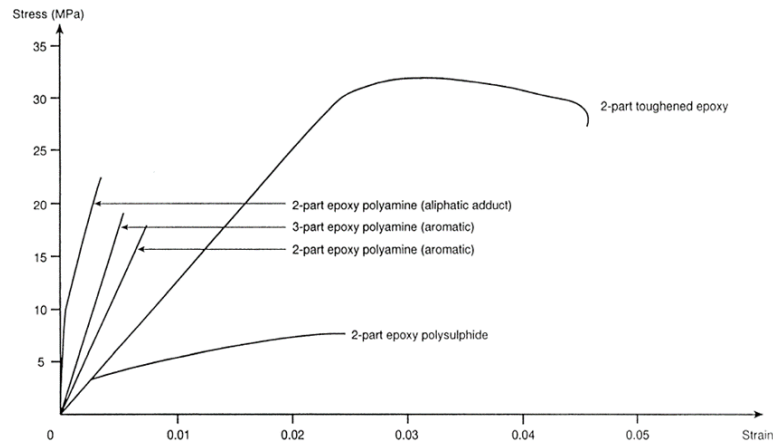


Figura 2.8 Comparação de tensão vs. extensão de diferentes tipos de epóxi (Hutchinson and Hollaway 1999)

Os adesivos apresentam um módulo de elasticidade relativamente baixo que decresce com o aumento da temperatura. As variações de temperatura têm uma grande influência na rigidez dos materiais adesivos, verificando-se no facto de apresentarem elevada rigidez e resistência à temperatura ambiente e, para temperaturas próximas de 100 °C, baixa rigidez e resistência.

A temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) define uma mudança clara nas propriedades do polímero. Acima da temperatura  $T_g$ , o material apresenta um comportamento tipo “borracha”. Pelo contrário e para temperaturas inferiores a  $T_g$ , apresenta-se bem mais rígido com aspeto vítreo (Figura 2.9) (ISIS 2007). Esta “barreira” depende da temperatura de cura do adesivo, sendo que, para temperaturas de cura mais elevadas observa-se um  $T_g$  também mais elevado (Hutchinson and Hollaway 1999).

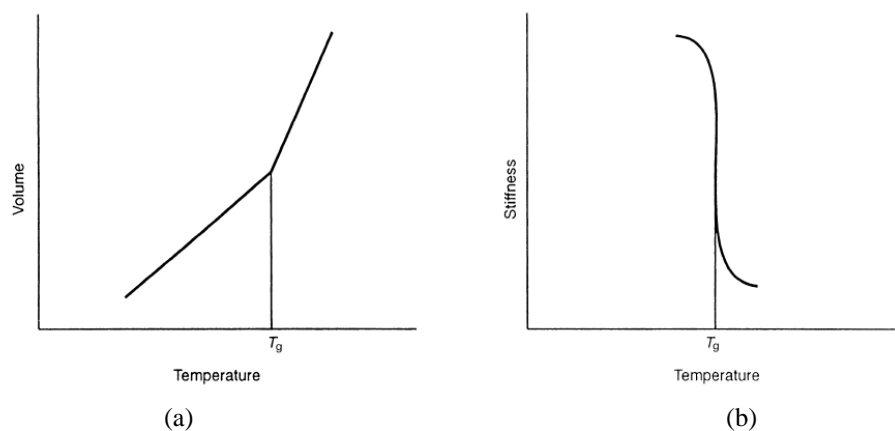


Figura 2.9 Influência da transição vítrea (a) no volume; (b) na rigidez (Hutchinson and Hollaway 1999)

É necessário ter-se em conta o facto dos polímeros orgânicos absorverem humidade, refletindo-se numa plastificação do próprio adesivo, modifica assim a resposta à deformação mecânica diminuindo consideravelmente a sua rigidez. Conclui-se que a presença de água tem um efeito similar à temperatura na rigidez destes materiais. A influência destes fatores está ilustrado na Figura 2.10 (a), (b) e (c).

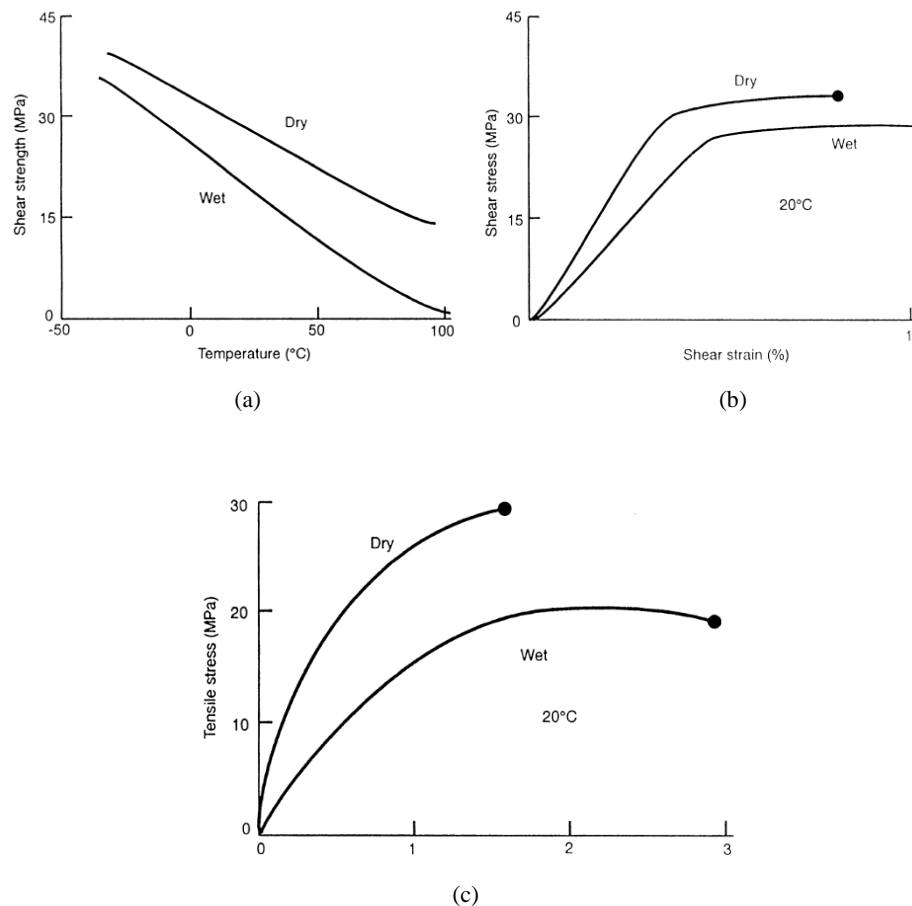


Figura 2.10- a) Influência do aumento de temperatura na resistência ao corte de colas epoxídicas com e sem a presença de humidade; b) influência da presença de humidade na resistência ao corte de uma cola epoxídica a uma temperatura constante de 20° C; c) influência da presença de humidade na resistência à tração em colas epoxídicas (Hutchinson and Hollaway 1999)

O efeito das condições de cura no desenvolvimento das propriedades mecânicas do adesivo é um dos problemas menos investigados no reforço de estruturas com compósitos. Assim, a quantificação do efeito da temperatura de cura, da presença de humidade e da duração do desenvolvimento da resistência permitiria melhorar, significativamente, a preparação e a instalação nas diferentes aplicações do reforço. (Czaderski et al. 2012).

Foi verificado que, para temperaturas elevadas, os adesivos apresentavam um tempo de cura bastante menor. Lapique e Redford (2002), por exemplo, concluíram que as mesmas propriedades mecânicas obtidas a 23 °C após 28 dias, podiam ser alcançadas em apenas 4 horas a uma temperatura de 64 °C. As mesmas observações foram feitas por Matsui (1990) que concluiu que a duração mínima de cura para conseguir a máxima resistência de corte está intimamente relacionada com a temperatura de cura (Czaderski et al. 2012).

Foi também estudada a influência da temperatura de cura na resistência dos adesivos. Vários autores como Dutta *and* Musallam e Cao *and* Cameron observaram a temperaturas elevadas durante a cura do adesivo, um incremento de rigidez e resistência à tração comparativamente a adesivos curados à temperatura ambiente, (Czaderski et al. 2012).

O conhecimento destas propriedades do adesivo é de extrema importância uma vez que permitem o desenvolvimento de novas técnicas de aplicação, como é o caso das ancoragens por gradiente de esforços, que necessita de uma cura acelerada do adesivo (Michels, Sena-cruz, et al. 2013).

### 2.3 REQUISITOS PARA A COLAGEM DO LAMINADO

A escolha de um adesivo adequado é apenas um de vários requisitos para uma boa ligação. Outros fatores irão afetar a resistência da ligação e por conseguinte o desempenho de todo o sistema de reforço, nomeadamente (Barros 2004):

- Dimensionamento apropriado da ligação;
- Preparação adequada das superfícies a ligar;
- Controlo da preparação da ligação;
- Proteção devida a condições nocivas durante a aplicação do reforço;
- Controlo de qualidade do trabalho realizado.

A utilização de uma ligação bem dimensionada e uma devida preparação da superfície de BA leva a um aumento da *performance* estrutural a curto e a longo prazo (Aiello and Leone 2008; Kang et al. 2012). Moustafa (1974), Hugenschmidt (1975) e Schultz (1976) concluíram que nos adesivos deve-se ter em conta a fraca resistência à delaminação e às forças de clivagem e não ao esforço de corte, uma vez que é improvável que seja um dos fatores limite. Concluíram ainda que nas estruturas de BA pelo contrário, a tensão de corte e a resistência ao arrancamento do betão de recobrimento, devem ser fatores críticos de dimensionamento (Hutchinson and Hollaway 1999).

## 2.4 TÉCNICAS DE REFORÇO

No âmbito do reforço à flexão de elementos de betão armado com laminados de CFRP, duas técnicas que têm sido amplamente aplicadas: a técnica EBR (*Externally Bonded Reinforcement*), onde o laminado (normalmente de carbono) é colado nas faces exteriores do elemento de BA e a técnica NSM (*Near-Surface Mounted Reinforcement*), em que os laminados são inseridos em rasgos efetuados no betão de recobrimento (Sena-Cruz et al., 2012). Na Figura 2.11 são também apresentados, dois sistemas baseados na técnica EBR, que consistem na incorporação de uma ligação mecânica, por aplicação de parafusos ao longo do laminado. As duas técnicas são bastante similares, com a particularidade de na técnica MF-EBR ser aplicada uma camada de adesivo, o que não acontece na técnica MF-FRP. Estas características deste tipo de reforços estão ilustradas na Figura 2.11 (Coelho, Silva, et al. 2011).

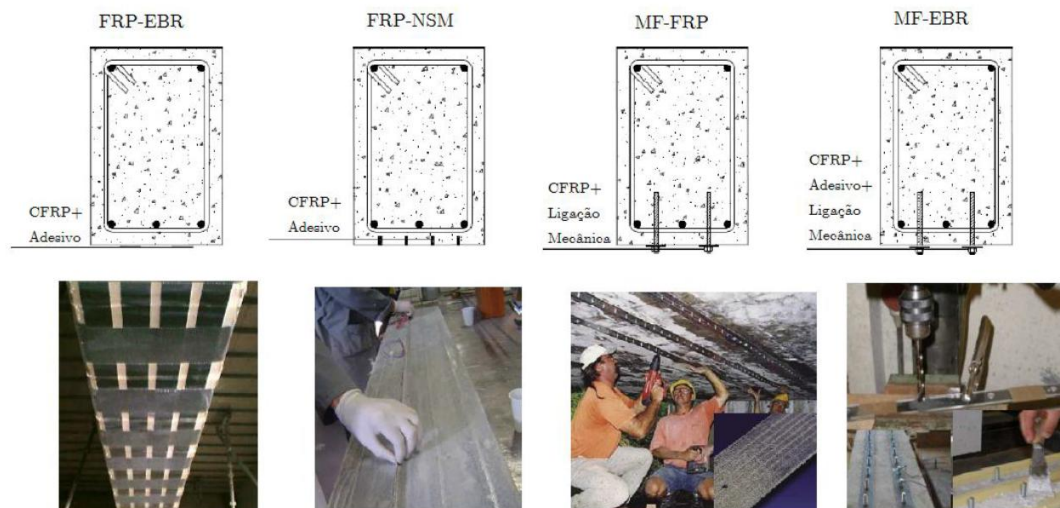


Figura 2.11 Técnicas de reforço com recurso a laminados de carbono (CFRP) (J. Sena-Cruz 2011)

### 2.4.1 SISTEMA NSM (*NEAR-SURFACE MOUNTED*)

O sistema de reforço NSM é proposto como um sistema que visa o aumento de capacidade de carga de elementos de BA. A técnica de aplicação de reforço consiste na inserção de varões ou laminados de CFRP em rasgos no recobrimento nominal de vigas/ lajes de BA realizados com uma serra convencional. Estes rasgos são previamente preenchidos com um adesivo epoxídico. Quando são usados laminados de secção transversal de  $1.5 \times 10 \text{ mm}^2$ , a

largura e a profundidade da fenda efetuada variam, normalmente, entre 3 e 5 mm, e 12 e 15mm, respetivamente (Figura 2.12) (Barros 2004).

Esta técnica não envolve trabalhos especiais de preparação de superfície e, após serem realizados os rasgos, o tempo de aplicação, quando comparada com a técnica EBR, é menor. Os seguintes passos são normalmente adotados na aplicação da técnica NSM (Sena-Cruz, 2005):

- Abertura de rasgos no betão de recobrimento utilizando uma serra de corte (Figura 2.13 a);
- Limpeza dos rasgos com ar comprimido (Figura 2.13 b);
- Remoção das impurezas no reforço em FRP com um produto apropriado (ex. acetona);
- Preparação do adesivo de epóxi de acordo com as recomendações do fornecedor (Figura 2.13 c);
- Preenchimento das aberturas e das faces laterais do CFRP com o adesivo epóxi (Figura 2.13 d);
- Inserção do laminado CFRP na abertura anteriormente realizada, pressionando-o ligeiramente, forçando assim o adesivo epoxídico a circular entre o compósito e as bordas da abertura. Esta fase requer um cuidado especial garantindo um total preenchimento de todo o rasgo. Se este aspeto não for devidamente acutelado pode ocorrer a formação de vazios, que poderão comprometer todo o reforço (Figura 2.13 e).

O tempo de cura do adesivo (indicado pelo fornecedor) deve ser respeitado, estando o sistema completamente terminado quando o adesivo adquire as suas características resistentes máximas.

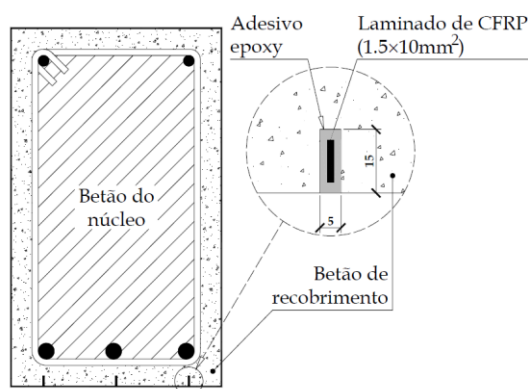


Figura 2.12: Esquema do sistema de aplicação do reforço de acordo com a técnica NSM (Sena-Cruz, 2002)

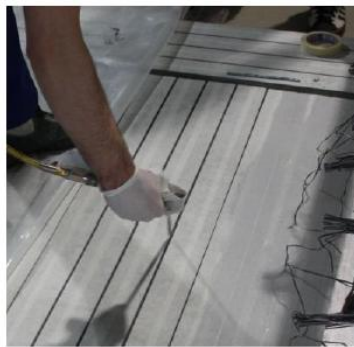
Embora seja uma técnica recente e menos utilizada, apresenta vantagens face à técnica tradicional de colagem (EBR), destacando-se as seguintes (Firmo 2010):

- Maior resistência a fenómenos de descolamento/arrancamento do CFRP, dada a existência de dupla área de colagem do laminado e de este se encontrar confinado;
- Maior proteção face aos atos de vandalismo;
- Redução da quantidade de CFRP empregue;
- Redução da superfície de betão a tratar;
- Melhoria do comportamento ao fogo, uma vez que não há contacto directo de fogo ao compósito.

A principal desvantagem da técnica de NSM é o facto da profundidade dos rasgos estar limitada à espessura do betão de recobrimento, impossibilitando, muitas das vezes, a aplicação do reforço. Tem ainda a desvantagem de ser um processo mais complexo e demoroso (devido ao tempo de abertura dos rasgos) do que o sistema EBR o que se reflete no custo final deste tipo de reforço.



a) Execução das ranhuras:



b) Limpeza dos ranhuras:



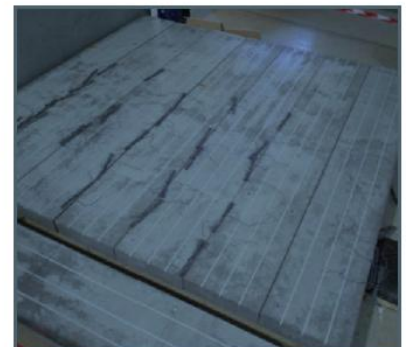
c) Preparação do epóxi:



d) Aplicação do epóxi:



e) Inserção do laminado e acabamento final:



f) Aspetto final:

Figura 2.13: Procedimento de aplicação de reforço de acordo com o sistema NSM (Almeida 2013)

O facto de ser uma técnica relativamente recente, faz com que esta apresente um défice em termos de investigação produzida na área. Porém, a técnica tem vindo a ganhar interesse de muitos investigadores. Blaschko e Zilc (1999) foram pioneiros no estudo desta técnica onde apresentaram uma comparação entre sistemas EBR e NSM em vigas de betão armado. Verificaram que a aplicação da técnica NSM conduzia a uma maior capacidade de carga e a sistemas mais dúcteis quando comparada com a técnica EBR (Carvalho 2010).

Este método não vai ser abordado nesta dissertação uma vez que a presente dissertação se foca no sistema EBR. Mais informação pode ser encontrada (Barros and Fortes 2005; Raafat El-Hacha and Soudki 2013; J. Sena-Cruz 2005).

#### 2.4.2 SISTEMA EBR (EXTERNALLY BONDED REINFORCEMENT)

Os sistemas de reforço exterior por colagem de elementos pré-fabricados através de adesivos epoxídicos (EBR) resultam de uma evolução da técnica de reforço através de chapas coladas, como foi apresentado anteriormente (Figura 2.14 (b)).

O comportamento do reforço é unidirecional, dada a natureza do material compósito e do tipo de ação a que se pretende resistir. Em aplicações correntes, a espessura do laminado varia entre 1 a 2 mm, e a largura é variável consoante os diferentes fabricantes e tipos de aplicações. O comprimento dos elementos de reforço necessários não é condicionante, dado que estes são geralmente acondicionados em rolos de 50 ou 100 metros, sendo cortados com a medida pretendida (Hutchinson and Hollaway 1999).

Do ponto de vista construtivo, esta técnica é consideravelmente mais simples e eficiente do que o reforço impregnado *in-situ*. Ao contrário deste último, os únicos cuidados especiais a considerar são o tratamento da superfície de betão e a aplicação do adesivo. A superfície de aplicação não deve apresentar sinais de degradação, garantindo condições de funcionamento satisfatório do sistema de reforço. De modo a potenciar a eficácia do interface entre o agente adesivo e a superfície de betão, esta deve ser tratada com o recurso a jato de areia, jato de água ou picagem mecânica de forma a remover a leitada de betão superficial. (Michels, Staśkiewicz, et al. 2014) A superfície final de aplicação não deve apresentar irregularidades geométricas superiores a 5 mm a cada 2 m, bem como uma humidade inferior a 4% (Barros and Fortes 2005).

Esta é, de todas as técnicas de reforço à flexão com compósitos, a mais antiga, estudada e difundida em aplicações práticas. A aplicação envolve essencialmente três tarefas (Barros, 2004):



- A primeira etapa consiste na preparação da superfície do elemento a reforçar para se conseguir boas condições de aderência. Numa primeira fase deve-se projetar a superfície do elemento de betão com um jato de areia ou preparada com um martelo de agulhas. De seguida a superfície deve ser limpa com ar comprimido;
- A segunda etapa recorre-se a um adesivo à base de resina epoxídica, para a colagem dos laminados por simples encosto (Figura 2.14 (a));
- A terceira etapa pode ser definida como um controlo de qualidade da técnica de reforço antes, durante e após a aplicação.



Figura 2.14 (a) Pormenor de aplicação de Laminados; (b) Reforço por adição de laminados (Carvalho 2010).

O desempenho do reforço é fortemente dependente da resistência do recobrimento nominal. Esta é a região mais afetada pelas intempéries e pelas condições ambientais, originando a diminuição do seu desempenho mecânico (Sena-Cruz, Barros, & Coelho, 2010). Por conseguinte, pode ocorrer uma rotura prematura do reforço FRP, não se tirando partido da totalidade da sua capacidade resistente, principalmente quando o reforço é aplicado através da técnica EBR. Outro inconveniente desta técnica é o requisito da superfície de betão ter de estar livre de humidade aquando a aplicação do reforço, o que nem sempre é possível devido às condições climatéricas e ao facto de ser necessário um tempo de cura mínimo (até um máximo de sete dias) para que se verifique a resistência total do sistema de reforço e a estrutura possa ser utilizada (Coelho, Fernandes, et al. 2011).

### 2.4.2.1 COMPORTAMENTO MECÂNICO

O comportamento de estruturas de BA reforçadas à flexão com sistemas EBR pode ser resumidamente caracterizado através da relação força vs. deslocamento apresentada na Figura 2.15. Este comportamento encontra-se dividido seguintes fases apresentadas (Firmo 2010):

- Fase 1: comportamento elástico da estrutura, que permanece válido até se atingir, numa secção, a resistência à tração do betão, dando início à fendilhação. Numa situação real de reforço, a estrutura já se encontra fendilhada, não apresentando o comportamento característico desta fase;
- Fase 2: caracteriza-se pelo comportamento elástico das armaduras de aço e pela propagação da fendilhação no betão tracionado. As tensões de tração desenvolvidas na secção distribuem-se essencialmente, pelas armaduras e pelo sistema de reforço;
- Fase 3: inicia-se com a plastificação das armaduras de aço. Os incrementos de tensão de tração são absorvidos nesta fase pelo sistema de reforço até o betão atingir a sua resistência máxima à compressão;
- Fase 4: nesta fase pode ocorrer o destacamento do FRP antes do esmagamento do betão ou vice-versa (esmagamento do betão seguido de rotura no FRP). Vários fatores influenciam este comportamento como por exemplo, a classe de resistência do betão, a percentagem de armaduras ordinárias e a percentagem de reforço aplicada.

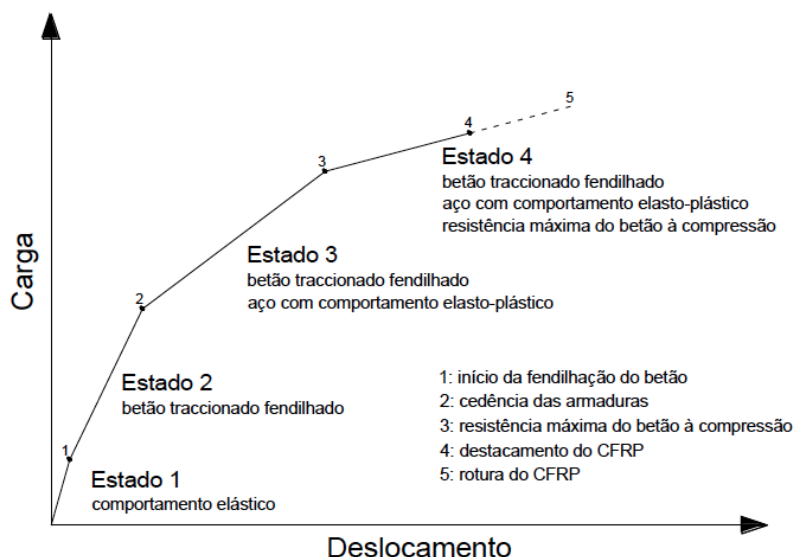


Figura 2.15: Diagrama multilinear carga-deslocamento central de vigas reforçadas à flexão com laminados de CFRP (Firmo 2010).

A Figura 2.16 ilustra os diagramas-tipo momento-curvatura de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP para diferentes taxas/percentagens de reforço, bem

como o diagrama de uma viga de betão armado não reforçada. Podemos observar que, com o aumento da percentagem de reforço, a viga tende a apresentar uma resistência mais elevada e uma menor capacidade de rotação. Conclui-se então que apesar de o reforço aumentar a capacidade resistente de uma viga/laje, este diminui consideravelmente a sua ductilidade (Firmo 2010).

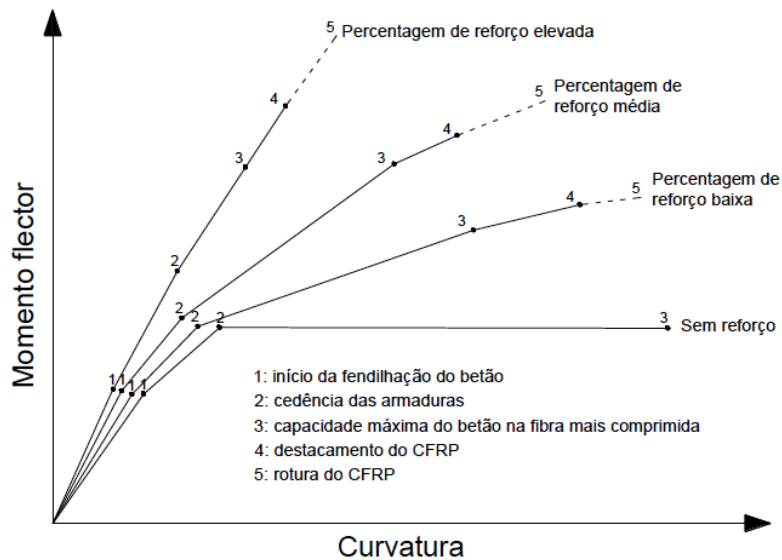


Figura 2.16: Diagramas momento-curvatura a meio vão de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de CFRP (Firmo, 2010).

Na Figura 2.17 está ilustrada uma progressão típica da fendilhação de uma viga reforçada. A Figura 2.17(a) mostra o início da formação das fendas de flexão, na região onde o momento é constante e é atingido a força da resistência máxima do betão à tração. À medida que o carregamento aumenta, as fendas propagam-se para cima, mas continuam pouco espessas em toda a história de carregamento, sendo bastante menores que as fendas de uma viga não reforçada. Isto mostra o efeito de entrave que o laminado oferece à abertura das fendas, que é uma melhoria considerável no comportamento em serviço da viga. As fendas de flexão e de flexão/corte começam a aparecer com o aumento de carga. Estas aparecem cada vez mais afastadas da zona de meio vão (Figura 2.17(b)). As fendas inclinadas propagam-se em direção aos pontos de carregamento, sendo mais rasas em ângulo junto aos apoios. Esta fendilhação diagonal é o resultado do aumento de esforço transversal verificado nas vigas/ lajes. Verifica-se um aumento de largura nestas fendas à medida que o carregamento aumenta, mantendo-se bastante próximas da base da viga/laje, demonstrando o efeito de confinamento do laminado. Em determinado momento formam-se fendas diagonais perto ou mesmo localizadas nas

extremidades do laminado (Figura 2.17(c)) e propagam-se bruscamente na direção das armaduras. Nesta altura, verifica-se uma separação da viga, destacando o betão de recobrimento provocando o colapso da estrutura. Na Figura 2.17(d) apresenta-se esta separação que normalmente estende-se a todo o comprimento de corte, podendo mesmo em alguns casos destacar a zona de meio vão (Garden et al. 1998; Hutchinson and Hollaway 1999).

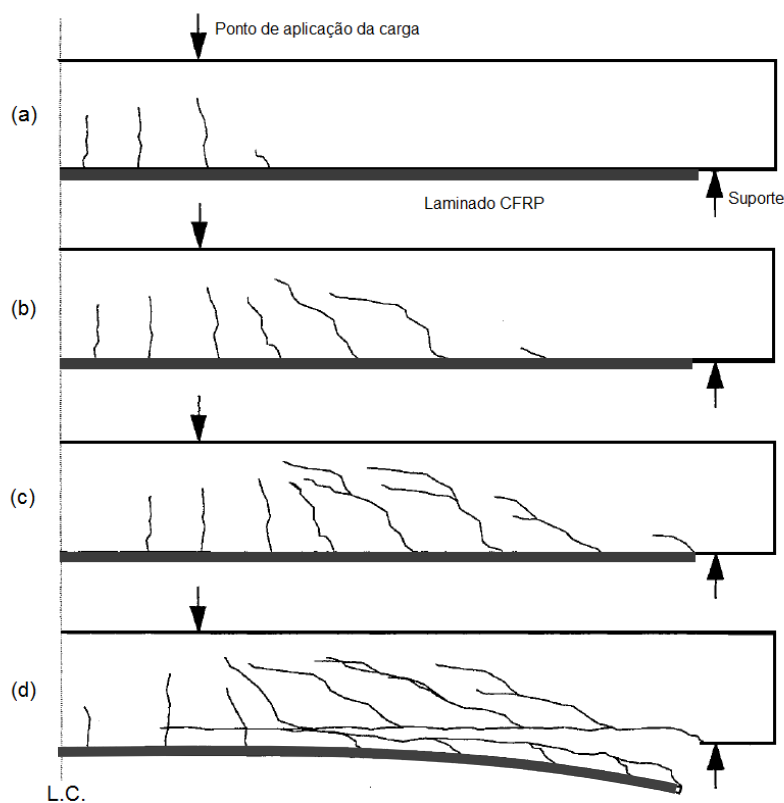


Figura 2.17: evolução do descolamento do laminado numa viga reforçada típica (Hutchinson and Hollaway 1999).

#### 2.4.2.2 MODOS DE ROTURA

Em todos os estudos experimentais no âmbito do reforço estrutural são apresentados os modos de rotura observados nos ensaios. Isto deve-se ao facto de ser extremamente importante a identificação dos diferentes modos de rotura, para se melhor compreender o comportamento de todo o sistema. Esta evolução no conhecimento leva a que haja um desenvolvimento nos critérios de dimensionamento o que se reflete numa melhoria necessária à aplicação destas técnicas de reforço.

Existem duas formas diferentes de interpretar os modos de rotura. Podemos interpretar com base no comportamento estático a curto prazo ou podemos analisar os modos de rotura que

resultam de comportamentos dinâmicos a longo prazo de estruturas reais reforçadas, onde os trabalhos realizados são bastante escassos, como é o caso do estudo realizado por Czaderski & Motavalli (2007), numa viga de uma ponte com 17 metros de comprimento e o estudo realizado por Diab, Wu, & Iwashita, (2009) em ancoragens metálicas sob diferentes condições.

Os ensaios com laminados de CFRP analisados por alguns investigadores do Laboratório Federal Suíço de Ciência e Tecnologia de Materiais (EMPA), nomeadamente Kaiser (1989), Deuring (1993) e Meier *et al.* (1993), conduziram à observação dos seguintes modos de ruína (Figura 2.18) (Juvandes, 2002):

- Rotura violenta e brusca na secção mais tracionada do laminado de CFRP. Este limite é precedido por sons crepitantes no laminado e por fendilhação e deformações elevadas no betão (pode ser detetada por sonda acústica);
- Esmagamento da zona comprimida da viga (ruína clássica no betão);
- Ocorrência de escorregamento de uma secção de betão por esforço transversal, situação observada como um segundo efeito que pode conduzir ao colapso do laminado;
- Destacamento do laminado devido a deslizamentos do betão na zona tracionada (efeito secundário). Esta situação proporciona o destacamento antecipado do laminado, de forma contínua ou brusca, sem qualquer benefício para a estrutura, em consequência de quatro situações possíveis: [1] superfície irregular do betão; [2] fendilhação de corte ("*sudden peel-off*"); [3] estado avançado das fendas de flexão ("*continuous peel-off*"), [4] efeito de extremidade do laminado (ver Figura 2.18));
- Corte interlaminar ou delaminação da chapa de CFRP, observado como uma segunda situação de ruína;
- Ruína por cedência da armadura interna na zona mais tracionada ou quando se esgota a sua resistência à fadiga.

Contudo, segundo Juvandes (2002), existem outros modos de ruína teoricamente possíveis, e que são originados por:

- Rotura na coesão interna do adesivo;
- Rotura na aderência da superfície de ligação (ruína adesiva) entre o laminado e o adesivo;
- Rotura na aderência da superfície de ligação (ruína adesiva) entre o betão e o adesivo (improvável se a superfície for tratada convenientemente).

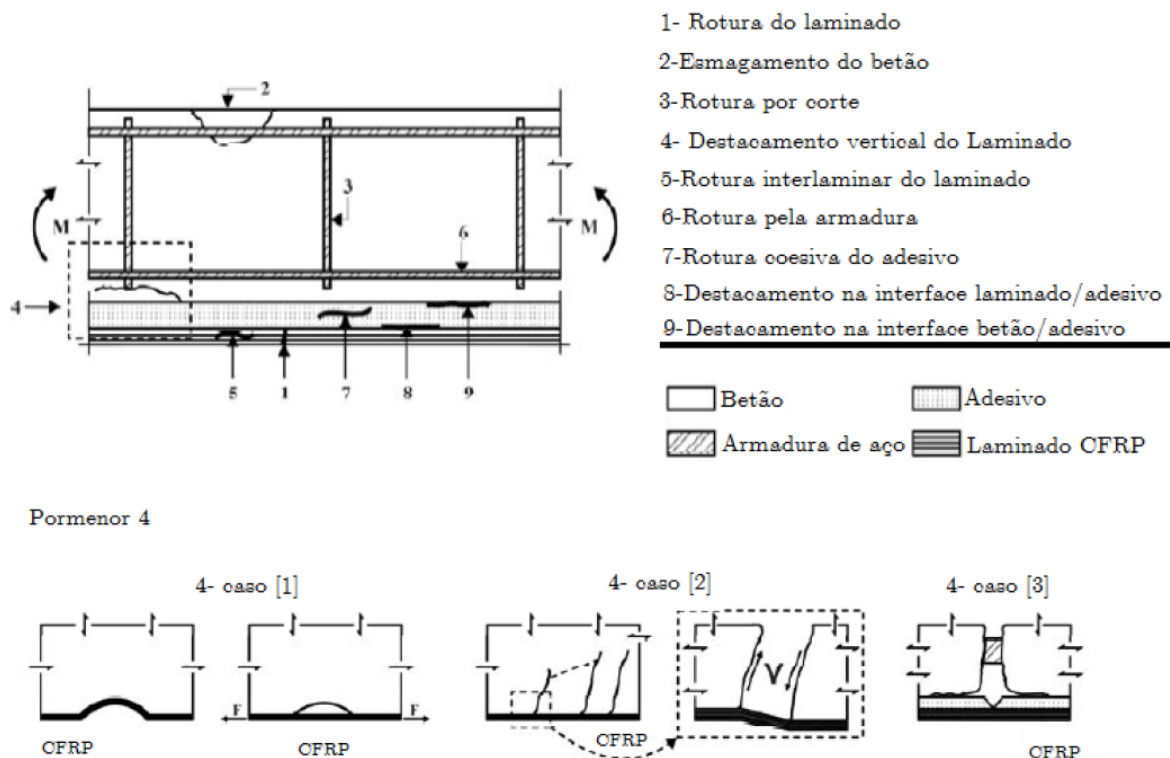


Figura 2.18: Possíveis modos de rotura em elementos de BA reforçados com laminados CFRP (Juvandes 2002).

## 2.5 PRÉ-ESFORÇO

Apesar da grande utilização de laminados CFRP no reforço de estruturas de BA à flexão pela técnica EBR, estudos indicaram que apenas era utilizado 30 a 35% da capacidade máxima dos compósitos (Dong-suk, Sun-Kyu, and Kenneth 2009; Kotynia, Lasek, and Staskiewicz 2014; You, Choi, and Kim 2012).

A aplicação de laminados CFRP pré-esforçados no reforço de estruturas de BA, combinam os benefícios do sistema de reforço passivo (técnica EBR) com as vantagens associadas à aplicação de pré-esforço externo. Esta conclusão conduziu à realização de vários estudos (R El-Hacha, Wight, and Green 2001; Michels, Sena-Cruz, et al. 2013) e várias vantagens foram apontadas. Esta técnica de reforço de estruturas mostrou-se bastante interessante, uma vez que leva a uma redução da flecha, atua contra as cargas permanentes, retarda o aparecimento das primeiras fendas e reduz a largura das mesmas, reduz os esforços nas armaduras e por conseguinte retarda a plastificação das mesmas, aumenta a resistência à fadiga, leva a um uso mais eficaz do betão e do próprio laminado, evita o colapso da estrutura devido a um descolamento prévio do laminado, aumento da carga de colapso estrutural

(capacidade resistente aos esforços transversos e flexão) (Raafat El-Hacha and Soudki 2013; Ghafoori et al. 2012; Michels, Sena-Cruz, et al. 2013).

Induzindo uma determinada percentagem de pré-esforço ao laminado, consegue-se obter um incremento da capacidade máxima de carga até 170% (Kim, Gordon Wight, and Green 2008; Xue, Zeng, and Tan 2008; You, Choi, and Kim 2012).

### 2.5.1 TÉCNICAS DE APLICAÇÃO DE PRÉ-ESFORÇO

Com a necessidade de tirar máximo partido das capacidades dos CFRP, foram desenvolvidos, nas últimas décadas, sistemas que permitem aplicar o pré-esforço necessário aos laminados.

No reforço a flexão com laminados CFRP existem várias técnicas que possibilitam a aplicação de pré-esforço. Estas dividem-se em três categorias, (R El-Hacha, Wight, and Green 2001): o pré-esforço por imposição de uma contra-flecha, o pré-esforço por pós-tensão e o pré-esforço por pré-tensão.

#### 2.5.1.1 SISTEMA DE IMPOSIÇÃO DE CONTRA-FLECHA

No sistema de imposição de contra-flecha ilustrado na Figura 2.19, os laminados FRP são, indiretamente, pré-esforçados por imposição de uma flecha contrária ao carregamento. São colocados macacos hidráulicos a meio vão, mantendo a viga deformada. O laminado é colado à face inferior da viga. Retiram-se mais tarde os macacos aquando da cura completa do adesivo (R El-Hacha, Wight, and Green 2001).

Este método tem um aproveitamento pouco eficiente do material, podendo danificar e provocar a cedência da viga. Num caso prático, o esforço requerido a meio vão para encurvar a estrutura é elevado comparativamente ao baixo pré-esforço induzido no laminado CFRP.

A essência desta técnica é a deformação da viga antes da colagem do laminado FRP, através de escoras posicionadas a meio vão (Figura 2.19 (a)). A aplicação do pré-esforço *in-situ* é, assim, bastante simples e resolve o problema da delaminação, já que o diagrama de momentos introduzido na viga tem forma triangular e o esforço de corte na linha de cola é constante e não muito elevado. A tensão imposta ao laminado não é constante ao longo do comprimento e está relacionada com a força imposta pelas escoras, que é por sua vez limitada pela resistência à flexão da viga e pela possibilidade de manter os apoios nas suas posições iniciais. A literatura disponível sobre esta técnica é muito escassa, mas assume-se que esta é usada na prática sem se considerar o efeito do pré-esforço (R El-Hacha, Wight, and Green 2001).

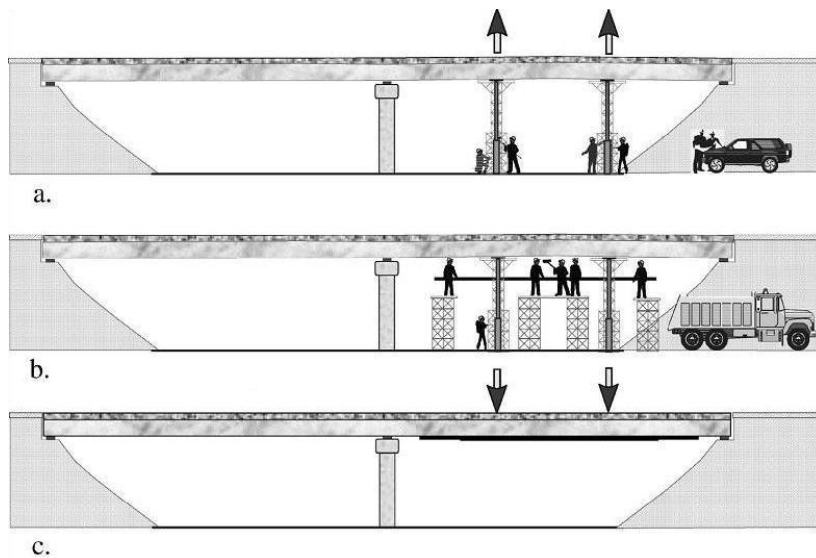


Figura 2.19: Exemplo de aplicação do sistema de pré-esforço por indução de uma contra-flecha. (a) Aplicação de uma força vertical de baixo para cima, através de macacos hidráulicos; (b) Posicionamento e colagem dos laminados; (c) Remoção dos macacos hidráulicos (R El-Hacha, Wight, and Green 2001).

#### 2.5.1.2 SISTEMA DE PRÉ-TENSÃO

O sistema de pré-tensão encontra-se ilustrado na Figura 2.20 e consiste na indução de pré-esforço ao laminado através de equipamentos independentes à estrutura, sendo depois o CFRP colado sob tensão. Uma vez tracionado, a face inferior da viga e a face superior do laminado é aplicado o adesivo. Após a cura do adesivo, o equipamento de pré-esforço é removido, e o esforço é transmitido à viga gradualmente até que os topos amarrados do laminado são cortados. Este método é particularmente, adequado para pequenas vigas testadas em laboratório. No entanto, é necessário equipamento especializado para vigas de grande dimensão ou aplicação em obra (R El-Hacha, Wight, and Green 2001).



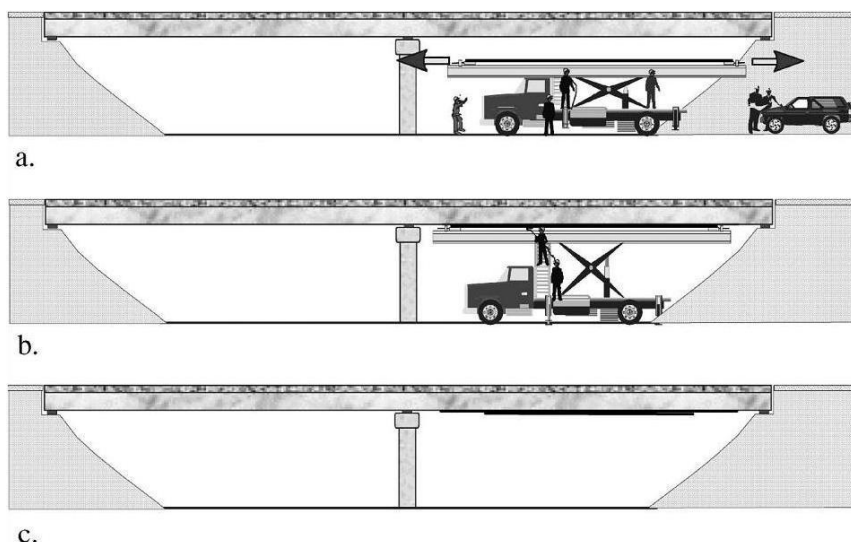


Figura 2.20: Aplicação de pré-esforço ao laminado por um equipamento independente à viga. a) Amarração e tração do laminado no aparelho de pré-esforço. b) Colagem do laminado tracionado. Cura da cola epoxídica. c) Corte do laminado nas ancoragens e transferência do esforço ao compósito (R El-Hacha, Wight, and Green 2001).

### 2.5.1.3 SISTEMA DE PÓS-TENSÃO

O terceiro método referido na literatura está representado na Figura 2.21. Numa primeira fase, o laminado é aplicado na viga de acordo com a técnica EBR. De seguida é bloqueado numa das suas extremidades através de uma ancoragem “cravada” à viga. O pré-esforço é aplicado na extremidade através de um macaco hidráulico que aplicará uma extensão no laminado até se obter o valor de tensão desejado no reforço. Quando for obtido o valor de pré-esforço desejado, o laminado é fixado com outra ancoragem na extremidade móvel (R El-Hacha, Wight, and Green 2001).

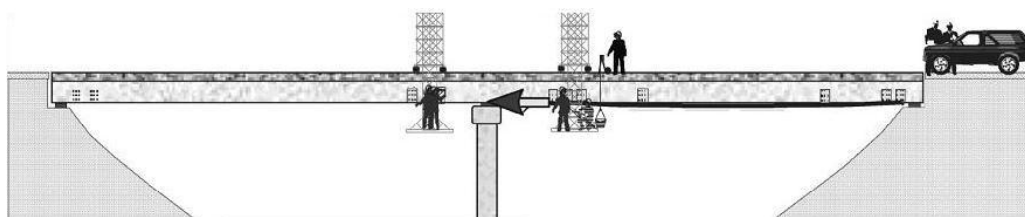


Figura 2.21: Aplicação de pré-esforço ao FRP pelo sistema de pós-tensão. Realização de uma ancoragem e aplicação de tensão ao laminado (R El-Hacha, Wight, and Green 2001).

### 2.5.2 COMPARAÇÃO DOS DIFERENTES SISTEMAS DE PRÉ-ESFORÇO

As técnicas mais utilizadas para reforçar estruturas com laminados FRP pré esforçados são as técnicas atrás mencionadas e ilustradas nas Figura 2.19 à Figura 2.21. A comparação

entre si estão apresentadas na Tabela 2.3, assim como as respetivas vantagens e desvantagens. A aplicação de pré-esforço no laminado oferece uma melhor resposta face às solicitações, mas está associada a uma maior probabilidade de rotura por delaminação devido às elevadas tensões de corte desenvolvidas no interface CFRP/superfície de betão. O sistema de pré-tensão quando comparado com os outros sistemas tem a vantagem de apenas utilizar equipamento ligeiro para a sua aplicação, e o facto de poder ser aplicado na maior parte das situações, mesmo quando o acesso é limitado à estrutura a reforçar. A técnica de pós-tensão tem a vantagem de incluir ancoragens independentes à viga a ser reforçada, traduzindo-se numa redução de custos de mão-de-obra. No entanto, esta economia é limitada se for aplicado pré-esforço transversal para providenciar um confinamento do betão nas zonas de ancoragem das fibras. Todos os três métodos necessitam de maior mão-de-obra do que a aplicação dos laminados não pré-esforçados, e assim, os benefícios que advêm do pré-esforço têm de ser ponderados com os custos adicionais (R El-Hacha, Wight, and Green 2001).

Tabela 2.3: Características dos sistemas de pré-esforço com FRP para aplicação *in situ* (R El-Hacha, Wight, and Green 2001).

Características	Sistemas de imposição de contraflecha	Sistemas de pré-tensão	Sistemas de pós-tensão
<b>Equipamento especializado</b>	Macacos hidráulicos de grande dimensão	Veículo do sistema de reforço	Pouco equipamento especializado
<b>Flexibilidade</b>	Pode ser aplicado a vigas de qualquer comprimento	Limitado pelo comprimento do sistema de reforço	Pode ser aplicado a vigas de qualquer comprimento
<b>Acessibilidade</b>	Requer espaço para os macacos	Requer acesso ao mecanismo externo e ao veículo	Requer acesso a equipamento ligeiro. É exequível pela parte superior
<b>Nível de pré-esforço</b>	Baixos	Alto, dependendo da ancoragem	Pode ser controlado
<b>Qualidade de reforço</b>	Usados mais materiais do que nos outros sistemas	O reforço pode ser usado com eficiência	
<b>Ancoragem</b>	Nenhuma	Pré-esforço lateral	Parte intrínseca do sistema
<b>Trabalhos in situ</b>	Moderados	Moderados, altos se for usado pré-esforço lateral	

### 2.5.3 NÍVEL DE PRÉ-ESFORÇO

De forma a conseguir usufruir das imensas vantagens que a técnica EBR possui, é necessário pré-esforçar o laminado até uma certa percentagem da sua tensão máxima. Testes experimentais em provetes de BA com compósitos pré-esforçados mostraram que os níveis de

pré-esforço deveriam ser pelo menos cerca de 25% da sua tensão última e para níveis de pré-esforço superiores a 70% da tensão máxima do laminado observava-se uma rotura violenta originada pela fratura do compósito (You, Choi, and Kim 2012). No entanto, para níveis de pré-esforço abaixo dos 60% da tensão máxima do laminado CFRP o modo de rotura mais comum era devido à descolagem do compósito, (Meier 1995). Mais tarde, Garden et al. (1998) sugeriram que um nível de pré-esforço de aproximadamente 50% da carga máxima do laminado era o mais adequado para um maior aproveitamento da resistência de tração do compósito. Recentemente Michels et al. (2013) apresentaram um novo estudo onde propõem que o valor de pré-esforço deve ser aplicado a nível da extensão e com valor dos 4 a 6 %.

#### 2.5.4 SISTEMAS DE ANCORAGEM

Normalmente, os laminados pré esforçados apresentam um nível de tensão elevado. Esta tensão reflete-se nos elevados esforços de corte concentrados nas extremidades. Este esforço pode ultrapassar a resistência máxima de tração do betão de recobrimento (mesmo para baixos níveis de pré-esforço) e comprometer todo o sistema de reforço, assim como a estrutura reforçada (Kang et al. 2012; Peng et al. 2014). Vários estudos verificaram que, é imperativo aplicar ancoragens especiais nos limites do laminado em sistemas de reforço pré-esforçados de forma a evitar roturas prematuras e se tirar máximo proveito do CFRP (Al-Mahaidi and Kalfat 2011; Kotynia, Lasek, and Staskiewicz 2014; Wight, Green, and Erki 2001). De forma a evitar este modo de colapso, devem adotar-se determinadas medidas no dimensionamento de reforços com compósitos. A resistência de corte nas zonas onde se verificam tensões superiores à resistência máxima do betão deve ser aumentada, através do uso de reforço transversal que exerça um confinamento adicional (Motavalli, Czaderski, and Pfy-Lang 2011). A adição de ancoragens nas extremidades do compósito reduz a deformação por corte que ocorre na camada de adesivo após a libertação da força de pré-esforço, reduzindo-se os esforços de corte transferidos à base da secção de betão a possibilidade de colapso prematuro (Kotynia, Lasek, and Staskiewicz 2014). Adicionando ancoragens nas extremidades do laminado é possível assegurar um comportamento mais dúctil e pode resultar num melhoramento do comportamento do serviço do elemento reforçado (You, Choi, and Kim 2012).

Considerando os fatores apresentados previamente, o sucesso do reforço pré-esforçado requer a aplicação de ancoragens nas extremidades do laminado. Dos vários tipos de ancoragem existentes, apenas serão estudados dois sistemas de ancoragens comercializados pela S&P *Clever Reinforcement Company*: (i) o sistema de ancoragem mecânico (MA – Mechanical

Anchorage), com recurso a chapas metálicas fixas nas extremidades dos FRP (Figura 2.22 (a)) e (ii) o método do gradiente (GA – Gradient Anchorage) da força (Figura 2.22(b)). Uma descrição mais completa das ancoragens existentes pode ser consultada em França (2007).

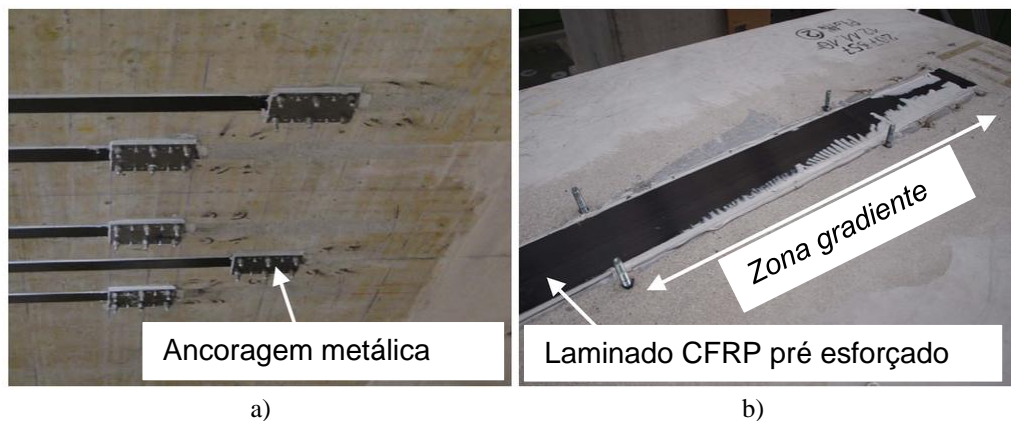


Figura 2.22 a) sistema EBR pré esforçado com ancoragem metálica; b) sistema pré esforçado com ancoragem por gradiente de esforços (Michels, Martinelli, et al. 2014).

#### 2.5.4.2 ANCORAGENS METÁLICAS

As ancoragens metálicas resultam da aplicação de um conjunto de parafusos e de chapas de alumínio nas extremidades do laminado. Estas oferecem a resistência necessária para contrariar os esforços concentrados verificados no betão de recobrimento, resultantes da aplicação do pré-esforço (El-Hacha & Soudki, 2013). Estas chapas metálicas são dimensionadas com base nos esforços de corte verificados no betão localizados nas extremidades dos laminados (Figura 2.22(a)) e são aparafusadas diretamente na viga/laje. Este tipo de ancoragem foi aplicado em inúmeras estruturas, desempenhando com sucesso a sua finalidade. Não obstante a isso, apresenta desvantagens tais como o facto de o sistema ser constituído por diversos materiais metálicos (chapas, parafusos, porcas, anilhas, etc.) materiais esses suscetíveis a agentes ambientais nocivos, tornando o sistema pouco duradouro e do tempo de aplicação/ tempo de cura do adesivo ser bastante longo torna-o ainda menos apelativo. Surgiram assim novos métodos de aplicação de pré-esforço, com o intuito de contrariar estas condicionantes (Kim, Gordon Wight, and Green 2008).

#### 2.5.4.2 ANCORAGEM POR GRADIENTE

A ancoragem por gradiente é baseada na característica do adesivo ter uma cura rápida a altas temperaturas, sendo utilizada para criar uma ancoragem não metálica puramente composta

pelo laminado CFRP, pela superfície do betão e a camada de adesivo (Czaderski et al. 2012; Michels, Staśkiewicz, et al. 2014). O princípio consiste no aquecimento de um segmento seguido de uma redução percentual da força de pré-esforço, distribuindo-se assim a força total pelos vários segmentos gradientes, evitando-se uma rotura prematura por descolamento (Michels, Zilie, et al. 2014). Este tipo de rotura pode ocorrer no caso de ser libertado uma parcela alta do pré-esforço total num único passo. A Figura 2.23 (a) representa esquematicamente a técnica de ancoragem. Após a cura a alta temperatura do primeiro segmento de adesivo com um comprimento de  $\Delta l_1$ , durante um tempo definido, a sua resistência é suficiente para resistir a uma porção  $\Delta F_1$  da força total de pré-esforço,  $F_p$ , que será sucessivamente libertada. Nesta fase, o resto de força concentrada ainda nos macacos hidráulicos é de  $F_p - \Delta F_1$ . Este procedimento é repetido até a força do pré-esforço ser nulo nas extremidades restantes do laminado (Michels, Sena-Cruz, et al. 2013).

Na Figura 2.23 (b) podemos ver, qualitativamente, a transferência de força. No caso de  $n$  passos de rápida cura/libertação, a respetiva força no macaco hidráulico no passo  $i$  é:

$$F_{\text{macaco hidráulico},i} = F_p - \sum_{i=1}^n \Delta F_i$$

Este procedimento é realizado simultaneamente nas duas extremidades do laminado. A força de pré-esforço aplicada ao laminado fora da área de ancoragem continua teoricamente constante, sendo igual á força total de pré-esforço  $F_p$  (Michels, Sena-Cruz, et al. 2013).

A principal vantagem desta nova ancoragem reside no facto da sua fácil aplicabilidade nas estruturas reforçadas com CFRP pré-esforçados. Há uma considerável redução de custos de mão-de-obra associado ao método, uma vez que todos os componentes podem ser transportados por uma única pessoa. Não sendo necessárias ancoragens metálicas nas extremidades, a solução de reforço é esteticamente mais apelativa e a estrutura apresenta durabilidade superior. Relativamente ao comportamento a longo prazo da ancoragem por gradiente, verificam-se perdas mínimas de tensão, sendo outra vantagem deste método / sistema (Michels, Sena-Cruz, et al. 2013).

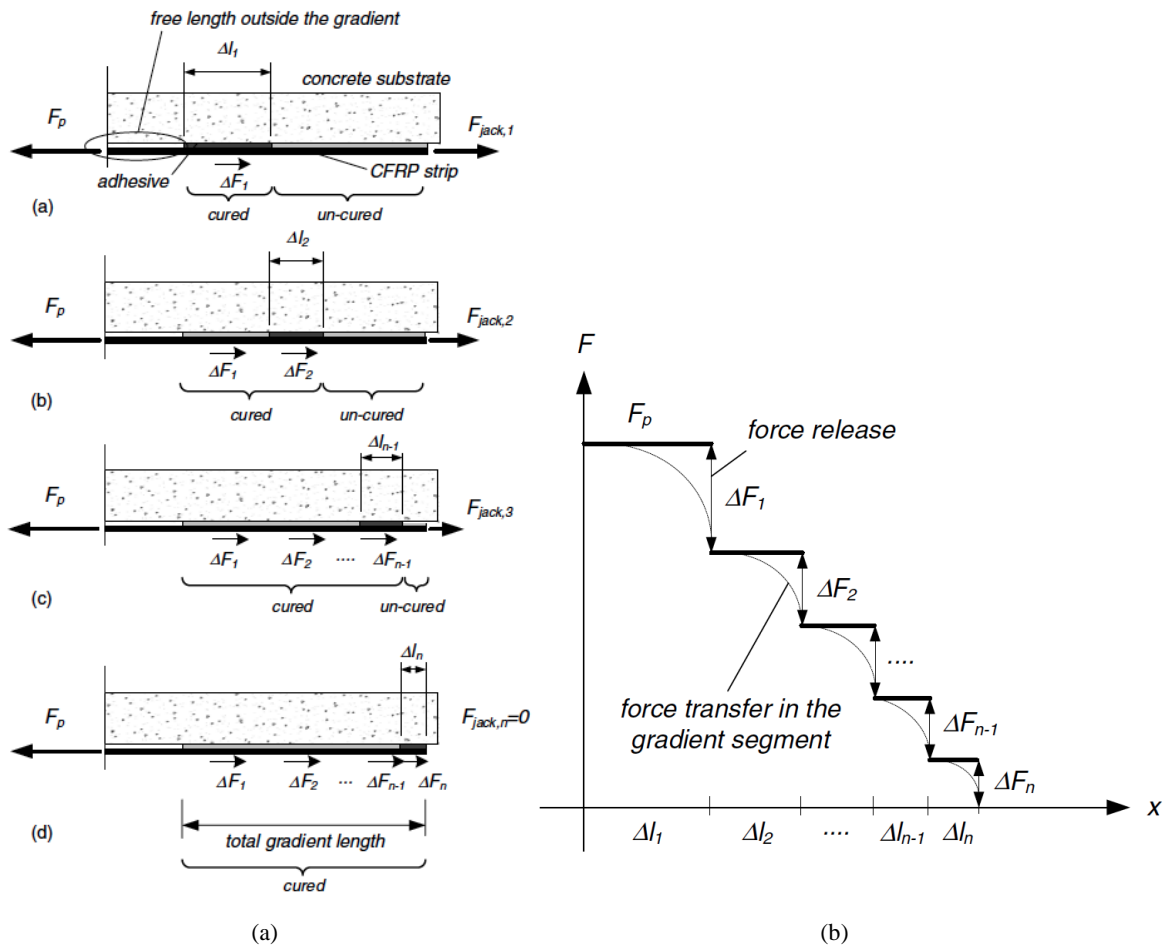


Figura 2.23: (a) Representação esquemática da ancoragem por gradiente; (b) Forças transferidas nos diferentes segmentos de gradiente (Michels, Sena-Cruz, et al. 2013).

## 2.6 CONCLUSÕES

Neste capítulo foi apresentado o estado de arte sobre a introdução de compósitos CFRP no reforço de estruturas de betão armado. Foram apresentadas todas as características destes materiais, vantagens e desvantagens associadas à sua aplicação e modos de aplicação nos diferentes tipos de reforço.

No âmbito do reforço à flexão, foram descritas as duas principais técnicas aplicáveis a estruturas de betão armado, a técnica EBR e a técnica NSM, e enumeradas as suas principais vantagens e desvantagens associadas a cada técnica.

Estudos realizados sobre a técnica EBR concluíram que apenas uma pequena parte das capacidades do laminado era utilizada, o que levou à aplicação de pré-esforço nestes sistemas, resultando em inúmeras vantagens no âmbito do reforço estrutural.

De forma a conseguir uma boa transferência de tensões entre o laminado pré-esforçado e a superfície de betão, é necessário a aplicação de ancoragens especiais nas extremidades do compósito. Assim, foram apresentadas dois sistemas de ancoragem (ancoragens metálicas e ancoragens por gradiente de esforços) com uma breve descrição da sua aplicação, incluindo também as respetivas vantagens e desvantagens.





## CAPÍTULO 3

### PROGRAMA EXPERIMENTAL

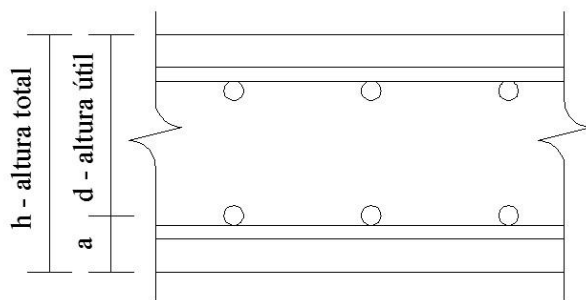
A eficácia do reforço à flexão de lajes com recurso a laminados de CFRP pré-esforçados foi avaliada através da realização de uma campanha de ensaios experimentais. Neste programa experimental a presença do pré-esforço, o tipo de ancoragem utilizada, a espessura e a largura do laminado foram os principais parâmetros avaliados. As lajes foram fabricadas e reforçadas nas instalações da empresa Tecnipor e mais tarde ensaiadas no laboratório de Estruturas (LEST) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho. No total, foram ensaiadas 12 lajes de betão armado com a mesma configuração geométrica e a mesma armadura longitudinal e transversal, variando apenas o tipo de reforço e a técnica utilizada na aplicação do mesmo.

O presente programa experimental insere-se no projeto FRPreDur (Comportamento estrutural a curto e longo prazo de elementos de betão armado reforçados à flexão com laminados de CFRP pré-esforçados), financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT). As seguintes secções detalham o programa experimental, a geometria, a preparação das lajes, a caracterização dos materiais e a configuração do ensaio.

#### 3.1 PROVETES E CONFIGURAÇÃO DOS ENSAIOS

A campanha de ensaios experimentais englobou 12 lajes de betão armado sendo composta por oito lajes com um comprimento de 2.6 metros e quatro com 2.4 metros. Tendo todas as lajes igual secção transversal de  $0.6 \times 0.12 \text{ m}^2$ . A secção transversal foi definida admitindo uma espessura mínima estrutural de 0.12 m e uma largura igual a cinco vezes a espessura, perfazendo 0.6 m.

Cálculo da altura útil:



$$a = \text{recobrimento} + \phi_{\text{estribo}} + \phi/2$$

$$a = 0.035 + 0.006 + 0.008/2 = 0.045\text{m}$$

$$\text{Altura útil} - d$$

$$d = 0,12 - 0.045 = 0.075\text{m}$$

Figura 3.1: Geometria da secção transversal

### 3.1.1 CÁLCULO DA ARMADURA NECESSÁRIA

O dimensionamento da armadura foi efetuado segundo a regulamentação europeia (euro códigos estruturais) sendo apresentados os cálculos de seguida. No presente estudo, procurou-se privilegiar-se um cenário de laje, fracamente armada, com uma percentagem mecânica de armadura próxima de 0,5%. Assim, face a estas condicionantes a carga máxima expectável para uma laje não reforçada será da ordem dos 20 a 25 kN. Por outro lado, a armadura transversal foi determinada de modo a assegurar a percentagem mínima de armadura de distribuição.

Admitindo cinco varões com um diâmetro de 8 mm para a armadura de distribuição (5Ø8) obtemos uma área de 251mm<sup>2</sup>.

$$\rho = \frac{A}{b \cdot d} \leftrightarrow \rho = \frac{251}{600 \cdot 75} = 0.56\%$$

Através da equação acima apresentada verifica-se que 5Ø8 é suficiente para respeitar o cenário desejado.

A armadura transversal foi imposta da mesma forma que a armadura de distribuição. O corte foi verificado apenas pela contribuição do betão ( $V_{Rd,c}$ ) sem fatores de segurança e para a laje reforçada.

A armadura de flexão foi definida com cinco varões com 8 milímetros de diâmetro cada (5Ø8) na face inferior e três varões de 6 milímetros (3Ø6) na face superior. Relativamente à armadura transversal, esta é constituída por estribos de 2 ramos de 6 milímetros com um espaçamento de 300 milímetros entre si (Ø6//0.30), de modo a prevenir a rotura prematura por corte das lajes. Na figura 3.2 apresenta-se as secções transversal e longitudinal das lajes de betão armado reforçadas com CFRP's.

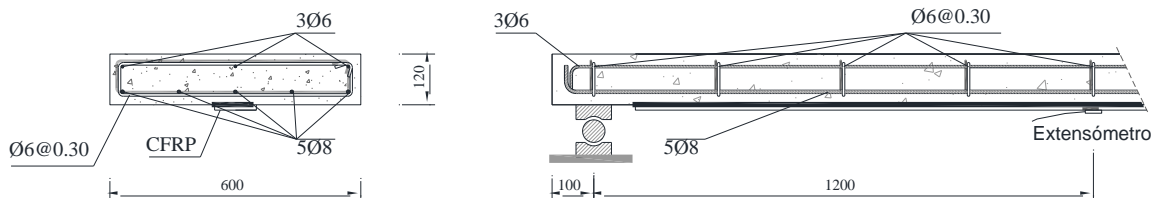


Figura 3.2: Geometria e configuração de ensaio: a) secção transversal; b) secção longitudinal.

### 3.1.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ESTRUTURAIS

As características mecânicas dos diferentes materiais utilizados nas lajes, conseguidas através dos respetivos ensaios de caracterização presentes nas respetivas normas são abaixo apresentadas. Assim, nas próximas secções são apresentadas as características do betão, aço das armaduras adesivo e laminado de CFRP.

#### 3.1.2.1 BETÃO

A betonagem do conjunto das 12 lajes foi realizado nas instalações da empresa Tecnipor. No contexto da avaliação das propriedades mecânicas do betão utilizado na produção das lajes, foram ensaiados seis provetes cilíndricos à compressão, com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, de cada betão produzido para o fabrico das lajes (Figura 3.3). O valor do coeficiente de esbelteza dos provetes cilíndricos ( $h/b$ ) foi de 2, onde  $h$  é a altura total e  $b$  o diâmetro do provete. Este valor de esbelteza foi adotado porque sob esforços de compressão, devido às zonas de fendilhação, o comportamento de amolecimento é dependente do tamanho do prisma e das condições de fronteira (Neville, 1995). Não obstante das condições de fronteira, se for adotada uma proporção adequada de esbelteza, é possível, pelo menos, para garantir comportamento uniaxial no centro do provete, obtendo-se resultados realistas para a resistência à compressão do material.

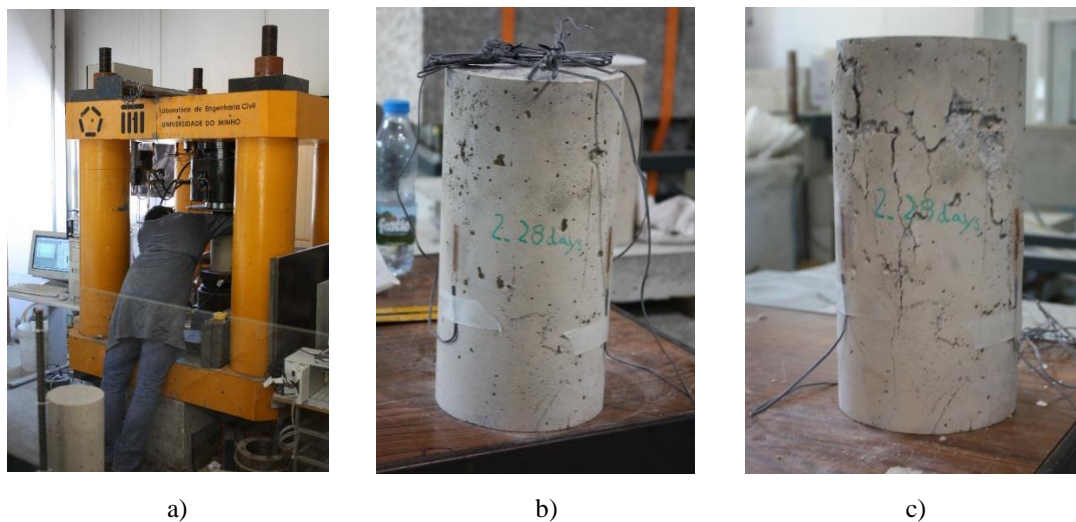


Figura 3.3: a) Aspeto geral da prensa; b) pormenor de um provete cilíndrico antes do ensaio; c) pormenor de um provete cilíndrico após rotura.

A avaliação do módulo de elasticidade e da resistência à compressão do betão, foi realizada em conformidade com as recomendações LNEC E397- 1993:1993 e NP EN 12390-3:2011, respetivamente. Refira-se que os provetes cilíndricos de betão e as lajes de BA foram ensaiados à mesma data no LEST.

O ensaio de compressão dos provetes de betão permite relacionar a não-linearidade do diagrama tensão-deformação com o processo de formação de microfissuras (Figura 3.4). Este processo apresenta quatro fases como:

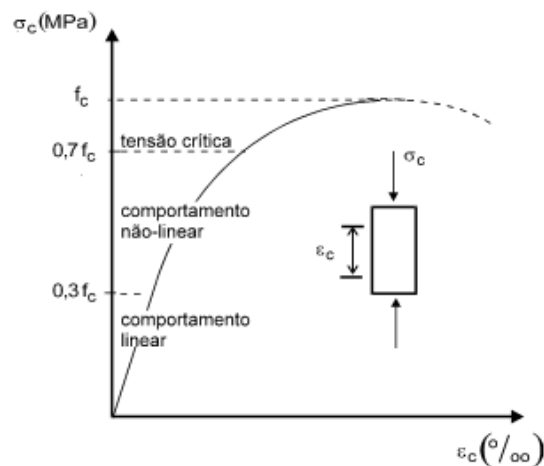
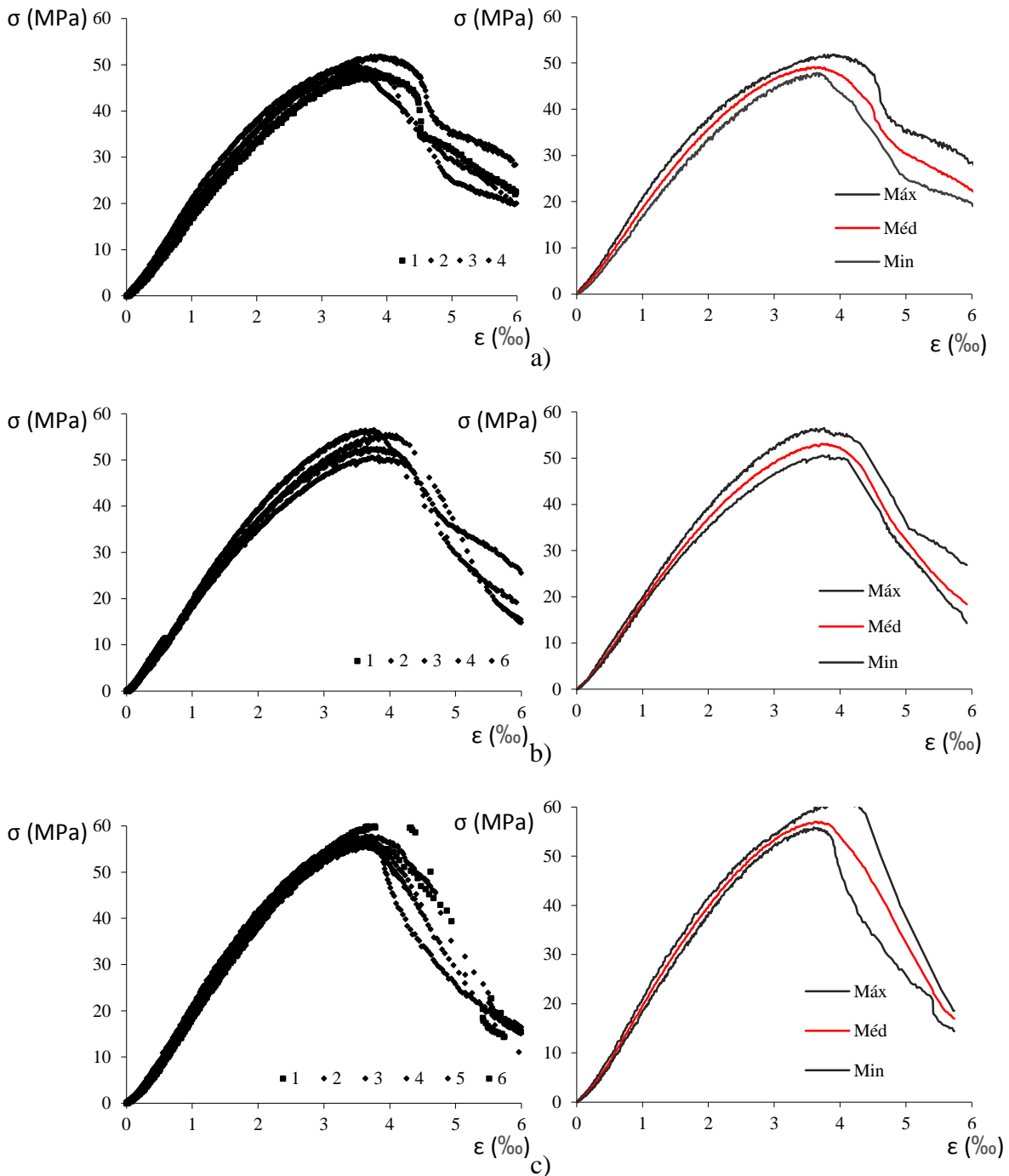


Figura 3.4: Relação tensão-extensão para um carregamento de compressão uniaxial de curto prazo de um provete de betão.

- A primeira fase corresponde a um baixo nível de tensão, até cerca de 30% da carga de rotura, onde as fissuras estão limitadas às existentes inicialmente no provete, em virtude da exsudação do excesso de água proveniente da betonagem e do carregamento na interface pasta-agregado. É uma fase em que o diagrama tensão-deformação do betão comprimido apresenta um comportamento quase linear.
- A segunda fase, define-se entre os 30% e até cerca de 70% da carga de rotura, ocorre um crescimento na quantidade de microfissuras na interface pasta-agregado e surgem microfissuras na pasta de cimento. Nesta fase ocorre o início do comportamento não-linear.
- A terceira fase caracteriza-se pela formação de microfissuras inter-granulares. É uma fase crítica, onde o diagrama tensão-deformação apresenta uma queda significativa da rigidez do material, mas sem perda da capacidade resistente.
- Finalmente, na quarta fase, onde se dá um acelerado desenvolvimento das macro fissuras, representada pela linha pontilhada da Figura 3.4, o betão apresenta uma queda da sua

capacidade resistente devido à instabilidade da estrutura da pasta de cimento promovida pela fissuração contínua até a rotura.

A betonagem das 12 lajes foi realizada através de quatro betonagens. Em seguida são apresentados os resultados relativos ao betão correspondente às diferentes betonagens. São apresentados dois gráficos representativos do comportamento do betão, onde o primeiro resulta dos dados obtidos segundo as seis amostras e o segundo representa a envolvente das respostas juntamente com a linha média entre elas (Figura 3.5). Na Tabela 3.2 estão apresentados os principais parâmetros dos diferentes provetes ensaiados.



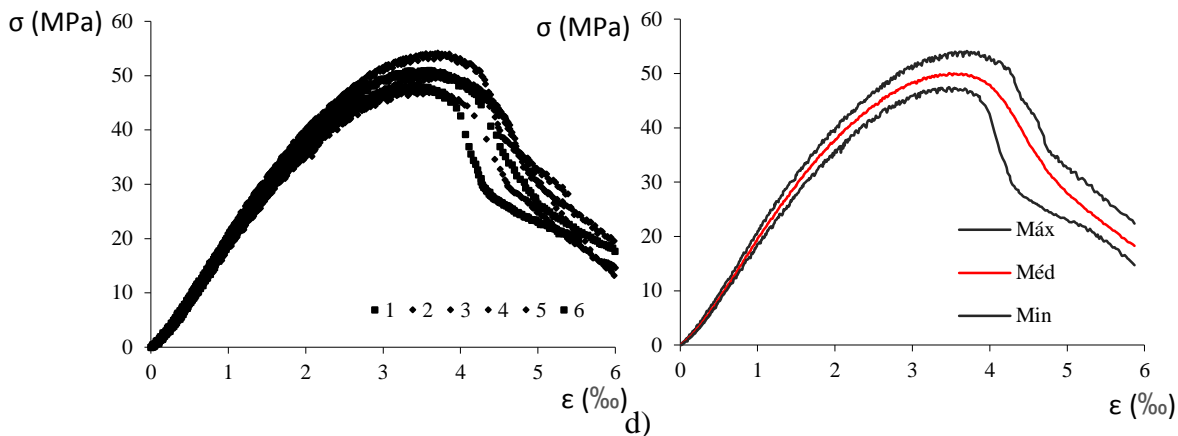


Figura 3.5: comportamento do betão ao longo do ensaio de compressão uniaxial correspondente às diferentes betonagens; a) betonagem realizada no dia 16/07/2013; b) betonagem realizada no dia 18/07/2013; c) betonagem realizada no dia 24/07/2013; d) betonagem realizada no dia 30/07/2013.

Tabela 3.1: Resultados dos ensaios de caracterização das armaduras

1ª Betonagem									
Provete	1	2	3	4	5	6	Média	Desvio Padrão	CoV (%)
fc (MPa)	48,13	48,48	51,87	49,69			49,54	1,46	3,0%
E (GPa)				30,69			30,69	0,00	0,0%
2ª Betonagem									
Provete	1	2	3	4	5	6	Média	Desvio Padrão	CoV (%)
fc (MPa)	51,76	55,47	50,69	56,51	-	52,59	53,40	2,22	4,2%
E (GPa)				35,48	31,07	29,92	32,16	2,40	7,5%
3ª Betonagem									
Provete	1	2	3	4	5	6	Média	Desvio Padrão	CoV (%)
fc (MPa)	61,10	55,92	56,12	57,74	57,21	56,29	57,40	1,78	3,1%
E (GPa)				32,56	32,56	32,63	32,58	0,03	0,1%
4ª Betonagem									
Provete	1	2	3	4	5	6	Média	Desvio Padrão	CoV (%)
fc (MPa)	50,97	47,49	50,09	54,16	50,91	48,22	50,31	2,16	4,3%
E (GPa)				33,14	31,68	31,70	32,18	0,68	2,1%

Procedeu-se à comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos por Sena-Cruz (2005), avaliando-se os valores obtidos e a qualidade do materia ensaiado. Sena-Cruz

(2005) obteve valores entre 44.4 e 67.5 MPa para os valores médios da resistência à compressão, sendo os valores apresentados muito semelhantes aos resultados obtidos na presente dissertação. Deste modo, validam-se ambos procedimentos e qualidade dos ensaios experimentais.

### 3.1.2.2 AÇO

As propriedades mecânicas do aço utilizado no presente programa experimental foram avaliadas em conformidade com as recomendações da NP EN ISO 6892-1:2012. Para cada diâmetro de aço ( $\varnothing 6$  e  $\varnothing 8$ ), utilizados no fabrico das lajes, foram ensaiados três provetes.



Figura 3.6: a)Aspeto geral dos ensaios de caracterização do aço; b) e pormenor do ensaio de tração

Através dos ensaios de caracterização foi possível determinar os valores médios da tensão de cedência ( $f_{ym}$ ), tensão de rotura ( $f_{tm}$ ), módulo de elasticidade ( $E_{sm}$ ) bem como os respetivos coeficientes de variação (CoV) para os diâmetros da armadura utilizada. Os valores foram conseguidos através da utilização de uma prensa de tração universal com uma capacidade máxima de +/- 100 kN. As extensões foram medidas através de um extensómetro mecânico. Todos os resultados são apresentados na

Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Resultados dos ensaios de caracterização das armaduras

Armadura	Tipologia	$f_{ym}$ (MPa)	CoV (%)	$f_{tm}$ (MPa)	CoV (%)	$E_{sm}$ (GPa)	CoV (%)
$\varnothing 6$	NR	579.3	3.3	669.7	1.7%	209.5	8.5%

---

Ø8	NR	501.4	5.9	593.9	3.9%	212.8	9.7%
----	----	-------	-----	-------	------	-------	------

---

Nas Figura 3.7 e Figura 3.8 apresentam-se as relações tensão-extensão dos provetes de aço obtidas nos ensaios.

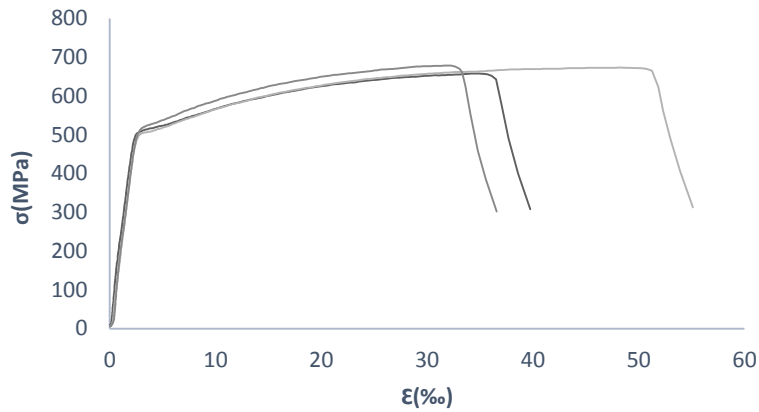


Figura 3.7: Relação tensão-deformação dos provetes de aço de Ø6

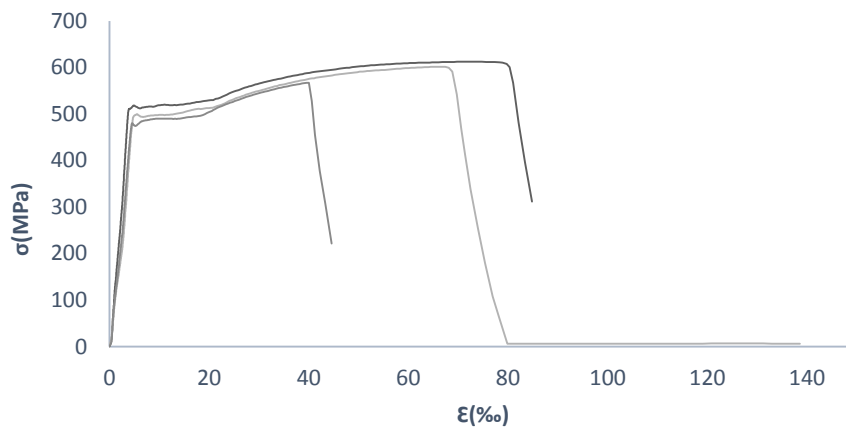


Figura 3.8: Relação tensão-extensão dos provetes de aço de Ø8

Através da análise das figuras acima apresentadas, é possível retirar as seguintes conclusões:

- De uma forma geral para cada tipo de armadura os resultados são bastante similares, indicando que se trata de material do mesmo lote;
- A armadura Ø8 apresenta um patamar de cedência, enquanto que no Ø6 tal não é possível de observar;
- A tensão na rotura do Ø6 é próxima dos 670 MPa, enquanto que no caso do Ø8 é de cerca de 600 MPa.



Seguidamente, compararam-se os resultados obtidos com os resultados apresentados por Fortes *et al.* (2002), avaliando-se os valores obtidos e as características do material ensaiado. Fortes *et al.* (2002) descreve um comportamento linear-elástico até aproximadamente 750 MPa para o varão de 6 mm e 500 MPa para o varão de 8 mm. Assim, verifica-se que os resultados obtidos na presente dissertação são similares dos resultados apresentados por Fortes *et al.* (2002). Posto isto, é possível indicar que a qualidade e os procedimentos são válidos.

### 3.1.2.3 LAMINADO DE CFRP

No reforço estrutural com laminados CFRP é fundamental o conhecimento detalhado de todas as propriedades do compósito utilizado, antes e após a sua aplicação. As propriedades do material fornecidas pelo fabricante e as características “reais” podem ser distintas, originando comportamentos diferentes do previsto inicialmente para o sistema estrutural (Juvandes 2002). A realização de ensaios de caracterização visa definir, fidedignamente, as propriedades mecânicas do laminado, eliminando possíveis erros na previsão do seu comportamento.

Nesta secção são apresentados os resultados da caracterização mecânica dos laminados CFRP utilizados, produzidos pela *S&PClever Reinforcement Ibérica Lda*. O módulo de Young ( $E_f$ ), a resistência máxima de tração ( $f_f$ ) e a extensão máxima dos laminados ( $\epsilon_f$ ) foram avaliadas de acordo com as recomendações ISO 527-5:1997. Os provetes foram preparados para terem um comprimento de 250 mm onde chapas de 50 mm de comprimento e 15mm de largura são coladas em cada uma das extremidades de forma a evitar rotura prematura do provete (ver Figura 3.9), devido a uma possível concentração de esforços induzidos pelas garras da máquina de ensaios.

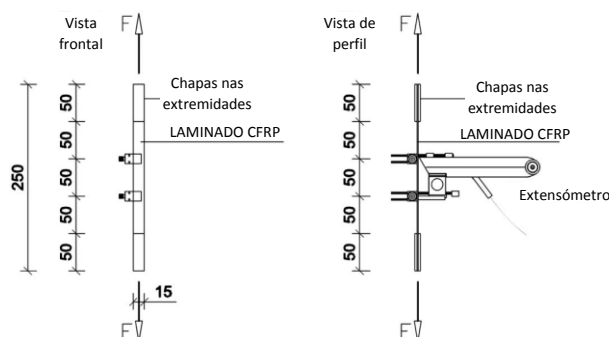


Figura 3.9: esquema de ensaio de caracterização dos laminados (Michels, Sena-Cruz, et al. 2013)

Os ensaios de caracterização foram também realizados no LEST, através de uma máquina de tração universal com uma capacidade de carga de  $\pm 1000$  kN. Os ensaios foram realizados a uma taxa de deslocamento controlado de 2mm/min. Para avaliar a tensão do laminado foram utilizados extensómetros. A força aplicada foi medida através de uma célula de carga com uma capacidade de carga de  $\pm 200$  kN. O esquema de ensaio é apresentado na Figura 3.10a). A rotura dos provetes teve início com a rotura das fibras nas extremidades do provete para uma tensão de cerca de 75% da tensão máxima resistente. De seguida, deu-se uma rotura frágil, acompanhada por um som forte. A Figura 3.10b) apresenta o aspeto dos provetes após ensaio. Em alguns provetes verificou-se que a rotura não se deu na zona central do laminado, o que pode ser justificado pela dificuldade de assegurar homogeneidade na distribuição e no seu alinhamento das fibras e na área da secção transversal (J. Sena-Cruz 2005).

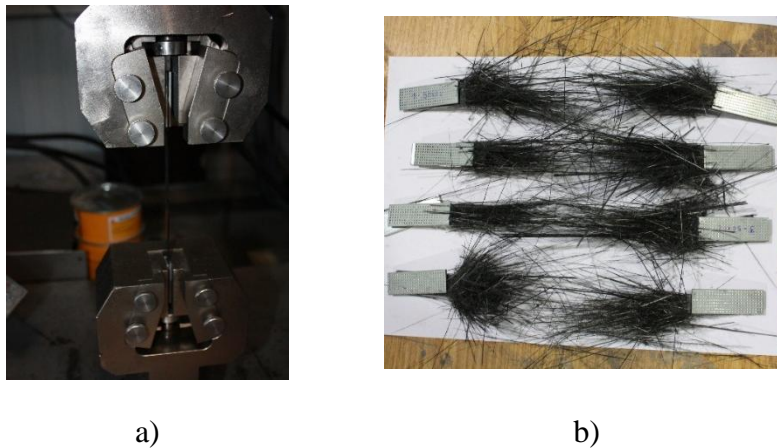


Figura 3.10: a) ensaio à tração do provete CFRP; b) aspeto dos provetes após rotura

Na

Figura 3.11 apresenta-se a relação uniaxial tensão *vs.* extensão obtida pelos provetes utilizados. Pode verificar-se que a relação tensão *vs.* extensão é linear até à rotura. Os valores da tensão máxima, módulo de Young ( $E_f$ ) e tensão máxima no valor de pico de tensão ( $f_f$ ) foram registados e apresentados na Tabela 3.5. Os valores dos coeficientes de variação (CoV) respetivos foram baixos e estão também representados na tabela. Esta informação foi conseguida através do ensaio de cinco provetes de cada um dos três laminados de diferentes secções ( $50 \times 1.4$  mm<sup>2</sup>;  $50 \times 1.2$  mm<sup>2</sup>;  $80 \times 1.2$  mm<sup>2</sup>) usados no âmbito do presente programa experimental.

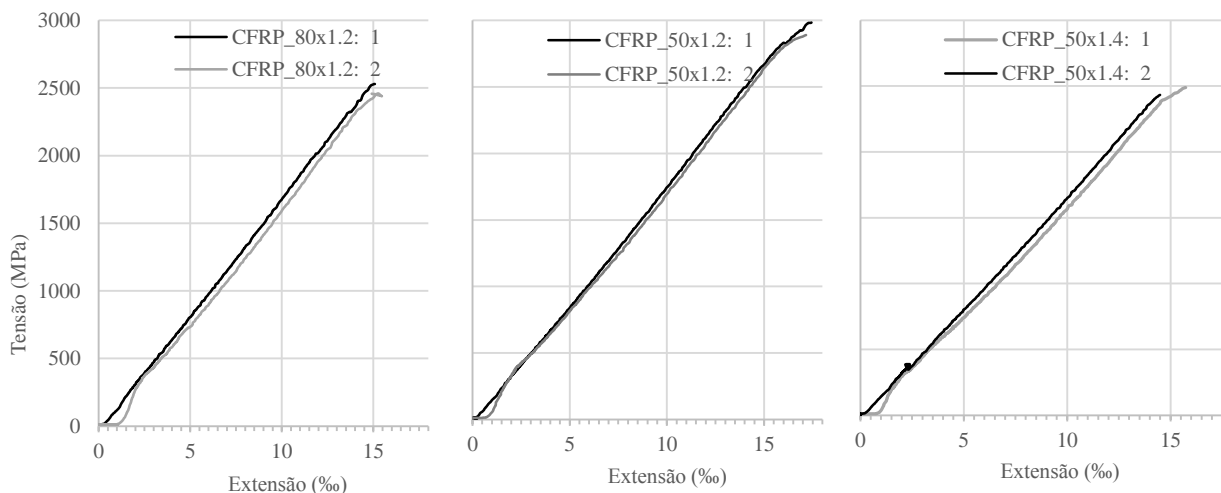


Figura 3.11: Relação tensão-deformação do ensaio de 2 provetes para cada um dos diferentes laminados utilizados no âmbito do programa experimental.

A caracterização das amostras de CFRP resultou nos valores apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Resultado das propriedades dos laminados CFRP obtidas na caracterização

Provetes	$f_t$ (MPa)	CoV (%)	$E_f$ (GPa)	CoV (%)
CFRP_50x1.2	2943.5	1.6	167.69	2.9
CFRP_50x1.4	2457.1	1.2	154.8	4.6
CFRP_80x1.2	2455.3	5.0	164.59	0.2

Sena-Cruz (2005) realizou ensaios de tração uniaxial, utilizando laminados provenientes do mesmo fornecedor, obtendo valores entre os 2700 MPa e os 3000 MPa para a resistência à tração. Por comparação dos resultados obtidos no presente trabalho com os resultados indicados por Sena-Cruz (2005) conclui-se que ambos os resultados são muito próximos, comprovando-se a correta execução dos procedimentos experimentais, assim como os valores obtidos.

### 3.1.2.4 ADESIVO EPOXY

De forma a conseguir uma boa aderência entre o laminado CFRP e o substrato foi utilizado um adesivo epoxídico com a designação comercial S&P 220 Resin. O adesivo resulta, da mistura entre dois componentes (resina e endurecedor).

De modo a obter informação sobre o comportamento mecânico, foram produzidos e testados 12 provetes de acordo com a norma ISO 527-2:1993, sendo adotado o seguinte procedimento: ambos os componentes foram homogeneizados individualmente; o endurecedor foi adicionado à resina com uma proporcionalidade de 4:1 (resina/endurecedor) em peso, de acordo com o fabricante, e ambos foram misturados durante 2 minutos com a utilização de uma batedeira a 1800 rpm; a mistura foi então interrompida, para se homogeneizar a mistura com uma colher, misturando-se novamente os componentes durante 2 minutos adicionais. Uma inspeção visual do produto misturado concluiu este processo, de forma a verificar a qualidade da mistura. O adesivo foi então colocado em moldes com a forma preconizada na norma ISO 527-2:1993 (Figura 3.12). A remoção dos provetes dos moldes foi realizada 24 horas após a colocação em molde.

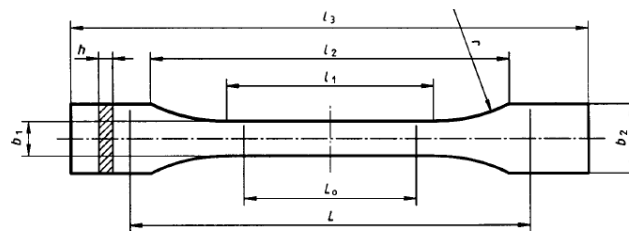


Figura 3.12: Forma dos provetes de ensaio preconizado na norma de caracterização.

A caracterização das propriedades do adesivo foi conseguida através da utilização de uma máquina universal de tração direta com controlo de carga efetuado através de uma célula de carga de capacidade de  $\pm 10$  kN. O ensaio foi controlado de forma a aplicar um deslocamento constante de 1 mm/ min (Figura 3.13).

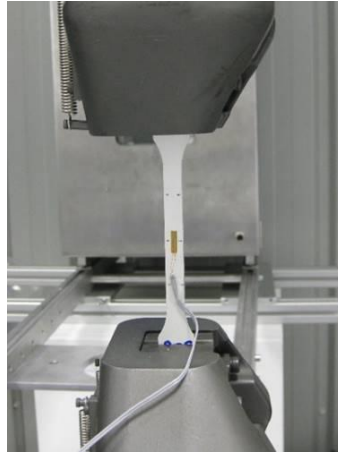


Figura 3.13: Ensaio de tração pura de um provete de epóxi.

As propriedades do adesivo foram também avaliadas de acordo com a norma ISO 527-5:1997 (E), obtendo-se os valores de módulo de elasticidade ( $E_f$ ) e de resistência máxima à tração ( $f_f$ ) apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Resultados dos ensaios de caracterização do adesivo epoxídico

Adesivo	$E_f$ (GPa)	CoV (%)	$f_f$ (MPa)	CoV (%)
S&P 220 Resin	6.3	4.7	24.4	1.8

Michels *et al.* (2013), efetuaram ensaios de tração uniaxial a provetes deste tipo de epóxi, tendo obtido o valor de módulo de elasticidade igual a 7.7 GPa (CoV=3.1%) e uma resistência à tração de 20.7 MPa (CoV=9.9%). Comparativamente foi obtido um valor de módulo de elasticidade 22% menor que o apresentado por Michels *et al.* (2013) e uma resistência máxima 18% superior. Assim, pela comparação dos resultados, verifica-se que os resultados obtidos são muito próximos dos valores obtidos por Michels *et al.* (2013), aferindo-se a sua qualidade e correta execução dos procedimentos experimentais.

### 3.1.3 PROGRAMA DE ENSAIOS

Tendo em consideração os diferentes parâmetros a avaliar, as doze lajes foram divididas em 2 grupos. As lajes com um comprimento de 2200 metros e as lajes de 2600 metros. O grupo das lajes com 2200 metros, contou com uma laje de referência (S2200\_REF), uma laje reforçada pela técnica EBR (S2200\_L50x1.4\_EBR). As outras duas lajes foram reforçadas com laminados pré-esforçados (de secção 50x1.4mm<sup>2</sup>) e foram utilizados dois sistemas de ancoragem (comercializados pela S&P Clever Reinforcement) para fixar as extremidades dos laminados pré-esforçados: o método do gradiente (GA) e o método de ancoragem mecânica

(MA). Nas lajes de maior comprimento, foram utilizadas duas lajes de referência, S2600\_REF1 e S2600\_REF2, nas quais não foi aplicado qualquer tipo de reforço, devido ao facto de terem sido realizadas duas betonagens distintas. O grupo das lajes com 2600m incluiu também uma laje reforçada pela técnica EBR, sem presença de pré-esforço, e cinco lajes reforçadas com laminados pré-esforçados. Duas das lajes foram reforçadas de acordo com o sistema GA e as restantes três reforçadas através das técnicas de reforço do sistema MA. De forma a conseguir aferir a importância das dimensões transversais do laminado no comportamento do reforço, foram utilizados três laminados com secções distintas. Na

Tabela 3.7 está apresentado o conjunto das lajes presentes no programa de ensaios.

O conjunto de lajes acima apresentado foi submetido a ensaios laboratoriais nomeadamente, a realização de ensaios monotónicos que consistem no carregamento até à rotura. Destes ensaios foi possível obter os seguintes parâmetros: (i) carga de rotura (kN); (ii) deformação máxima a meio vão; (iii) extensão máxima no laminado; (iv) início da fendilhação; (v) carga correspondente ao início da plastificação das armaduras; (vi) espaçamento entre fendas; (vii) modos de rotura.

As diferentes técnicas de aplicação do reforço visavam realizar a comparação dos diferentes parâmetros conseguidos nos ensaios. Deste modo, compararam-se as lajes de betão armado (as lajes de referência) e as lajes reforçadas (todas as lajes exceto as de referência). Posteriormente, foram comparadas as lajes reforçadas, i.e., compararam-se as lajes com e sem a aplicação de pré-esforço nos laminados. Relativamente às lajes reforçadas com laminados pré-esforçados, procedeu-se à comparação entre as diferentes técnicas de aplicação de pré-esforço.

Tabela 3.7: Programa experimental realizado

Lajes	Laminados [ $mm^2$ ]	Ancoragem	$\epsilon_{fp}$ [‰]	$f_{cm}$ (Mpa)	$E_{cm}$ (Gpa)
S2200_REF	-	-	-	50.3 (4.3%)	32.2 (2.1%)
S2200_L50x1.4_EBR	50x1.4 $mm^2$	-	-	50.3 (4.3%)	32.2 (2.1%)
S2200_L50x1.4_GA	50x1.4 $mm^2$	GA	3.98	50.3 (4.3%)	32.2 (2.1%)
S2200_L50x1.4_MA	50x1.4 $mm^2$	MA	4.00	50.3 (4.3%)	32.2 (2.1%)
S2600_REF1	-	-	-	53.4 (4.3%)	32.2 (7.5%)
S2660_REF2	-	-	-	57.4 (3.0%)	32.6 (0.1%)
S2600_L50x1.4_EBR	50x1.4 $mm^2$	-	-	53.4 (4.3%)	32.2 (7.5%)
S2600_L50x1.4_GA	50x1.4 $mm^2$	GA	4.05	53.4 (4.3%)	32.2 (7.5%)

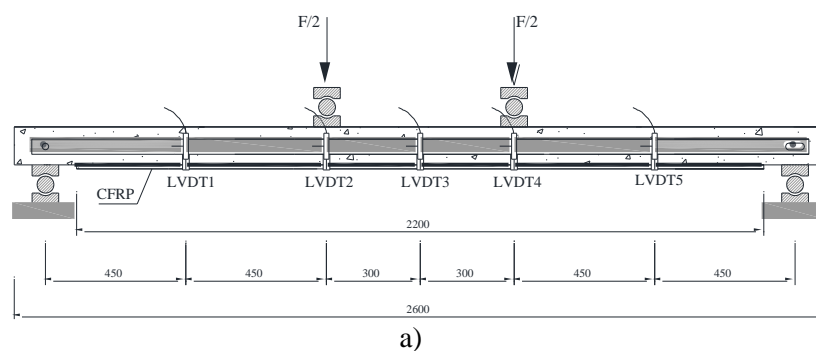
S2600_L50x1.4_MA	50x1.4 mm <sup>2</sup>	MA	3.98	53.4 (4.3%)	32.2 (7.5%)
S2600_L50x1.2_MA	50x1.4 mm <sup>2</sup>	MA	4.19	49.5 (3.1%)	n.a.
S2600_L80x1.2_GA	80x1.4 mm <sup>2</sup>	GA	4.06	57.4 (3.0%)	32.6 (0.1%)
S2600_L80x1.2_MA	80x1.4 mm <sup>2</sup>	MA	3.99	57.4 (3.0%)	32.6 (0.1%)

Nota:  $f_{cm}$ - Resistência à compressão média do betão;  $E_{cm}$ - Módulo de Young médio do betão; os valores dentro dos parenteses correspondem aos coeficientes de variação

A influência do laminado no comportamento à flexão da laje foi avaliado através da variação da sua largura e espessura, 50 mm/80 mm e 1.2 mm/1.4 mm respetivamente.

### 3.1.4 INSTRUMENTAÇÃO & CONFIGURAÇÃO DO ENSAIO

De forma a conseguir registar a deformação ao longo do eixo longitudinal das lajes, a instrumentação incluiu 5 transdutores diferenciais variáveis lineares (LVDT's), três dos quais se encontravam na zona de flexão pura (um a meio vão e os outros dois na linha de carga das forças aplicadas) com um campo de medida de  $\pm 75$  mm e um erro linear de  $\pm 0.1\%$ , e os outros dois na zona entre as cargas aplicadas e os apoios, tendo um campo de medida de  $\pm 25$  mm e um erro linear de  $\pm 0.1\%$ . A célula de carga utilizada possui uma capacidade de medição máxima de 200 kN e um erro linear de  $\pm 0.05\%$ . Foram também utilizados extensómetros (TML – Type BFLA-5-3) aplicados no laminado a meio vão de forma a registar a sua extensão. Foi utilizada para aplicar um deslocamento à laje através de dois pontos de carga indicados na figura a uma velocidade de 20  $\mu\text{m/s}$ . Na Figura 3.14 pode ser observado o esquema de ensaio adotado, a disposição dos LVDT's, a célula e os pontos de aplicação de carga.



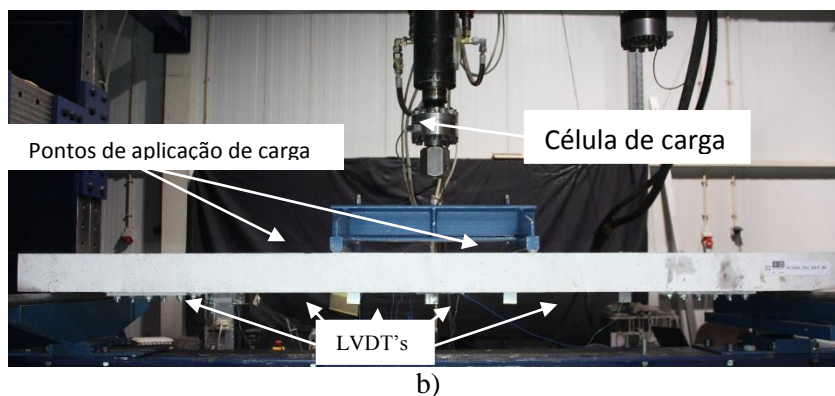


Figura 3.14: a) Configuração do ensaio laje 2600; b) esquema de montagem do ensaio

Durante a realização dos ensaios a evolução da largura de fendas foi monitorizada por intermédio do uso de um microscópio USB portátil (VEHO VMS-004D), com uma resolução nativa de 640×480 pixels e capacidade de ampliação máxima de 400×. No âmbito do presente trabalho, foi utilizado um fator de ampliação de 20×.

### 3.2 PROCEDIMENTOS DE APLICAÇÃO DO REFORÇO

Os procedimentos e os materiais utilizados na aplicação de laminados pré-esforçados são bastante similares para os sistemas de ancoragem mecânico (MA) e para o sistema de ancoragem por gradiente de esforços (GA). Os principais passos que foram usados são descritos nos parágrafos seguintes (Teixeira, Correia, et al. 2014). Nas figuras Figura 3.15 e Figura 3.16 encontram-se ilustrados os mesmos.

O primeiro passo passou pelo tratamento da superfície de betão com recurso a um esmeril na região onde o laminado de CFRP FOI aplicado (Figura 3.15a e Figura 3.16a). De seguida efetuou-se a remoção dos detritos com recurso a ar comprimido.

Realizaram-se os furos necessários à instalação das ancoragens provisórias para o caso do sistema GA e do sistema MA. No caso do sistema MA, as ancoragens definitivas foram usadas para fixar as chapas de ancoragem (Figura 3.15b e Figura 3.16b).

Depois de fixadas as ancoragens, foram colocadas guias de alumínio para guiar e fixar as unidades de aperto do laminado CFRP.

As unidades de fixação foram então colocadas entre as guias, em cada extremidade da laje (Figura 3.15b e Figura 3.16b).



De seguida foram colados extensómetros nos laminados em posições previamente definidas (ver Secção 3.1.3) com o objetivo de medir as extensões em distintas localizações.

O adesivo epóxi foi preparado de acordo com os requisitos descritos na respetiva ficha técnica. O laminado foi devidamente limpo com um solvente (acetona) de modo a retirar todas as impurezas. O adesivo epóxi foi então aplicado na superfície do laminado de CFRP, assim como na região da superfície de betão em contacto com o laminado. Em seguida, o laminado de CFRP foi colocado na sua posição definitiva e foi ligeiramente pressionado contra a superfície do betão (Figura 3.15c).

As unidades de fixação foram então fechadas e procedeu-se à colocação das placas metálicas de ancoragem nos sistemas como apresentado na Figura 3.15e. No caso do sistema GA instalaram-se os dispositivos de aquecimento (Figura 3.16e).

Seguidamente, foram aplicados os dispositivos metálicos que acomodam os cilindros hidráulicos. Estes são temporariamente fixados aos furos realizados anteriormente (Figura 3.15f e Figura 3.16f).

Numa seguinte fase para o sistema MA procede-se à instalação do cilindro hidráulico no interior dos dispositivos metálicos, (Figura 3.15g e Figura 3.16g). No caso em que o valor de pré-esforço a aplicar for reduzido assim como o comprimento do CFRP, pode optar-se pela utilização de apenas uma ancoragem ativa, como é o presente caso. No que respeita ao sistema GA é sempre necessário o uso de duas ancoragens ativas e, conseqüentemente, dois cilindros.

Finalmente, o pré-esforço é aplicado através de um macaco hidráulico manual, como apresentado na Figura 3.15h e Figura 3.16h.

Passado o tempo necessário de cura, todo o equipamento (necessário à instalação de ambas as técnicas) é removido, permanecendo apenas as chapas de ancoragem nas extremidades do laminado (o comprimento não necessário dos parafusos é cuidadosamente cortado) como apresentado na figura (Figura 3.15i) para o caso do sistema MA. No caso das lajes reforçadas com o sistema GA após a aplicação e remoção do equipamento, apenas se visualiza o laminado colado à superfície do elementos de BA, como mostra a (Figura 3.16i). De referir ainda que no caso do sistema MA será necessário esperar cerca de 24 horas para a remoção de todo o equipamento, enquanto que no caso do GA, o sistema pode ser removido logo após a cura do ultimo setor.

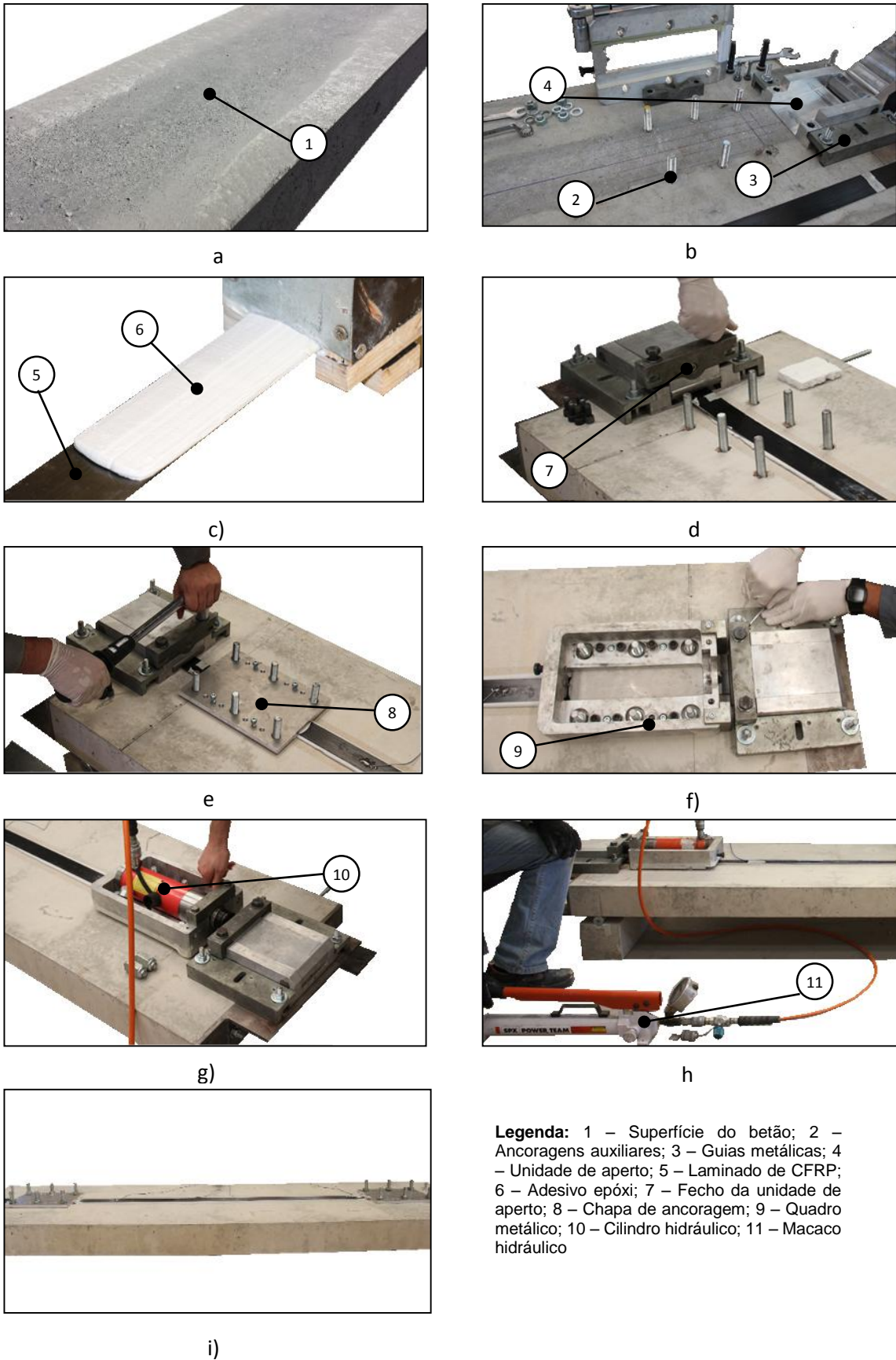


Figura 3.15: Procedimentos de aplicação do sistema MA (Teixeira, Correia, et al. 2014)

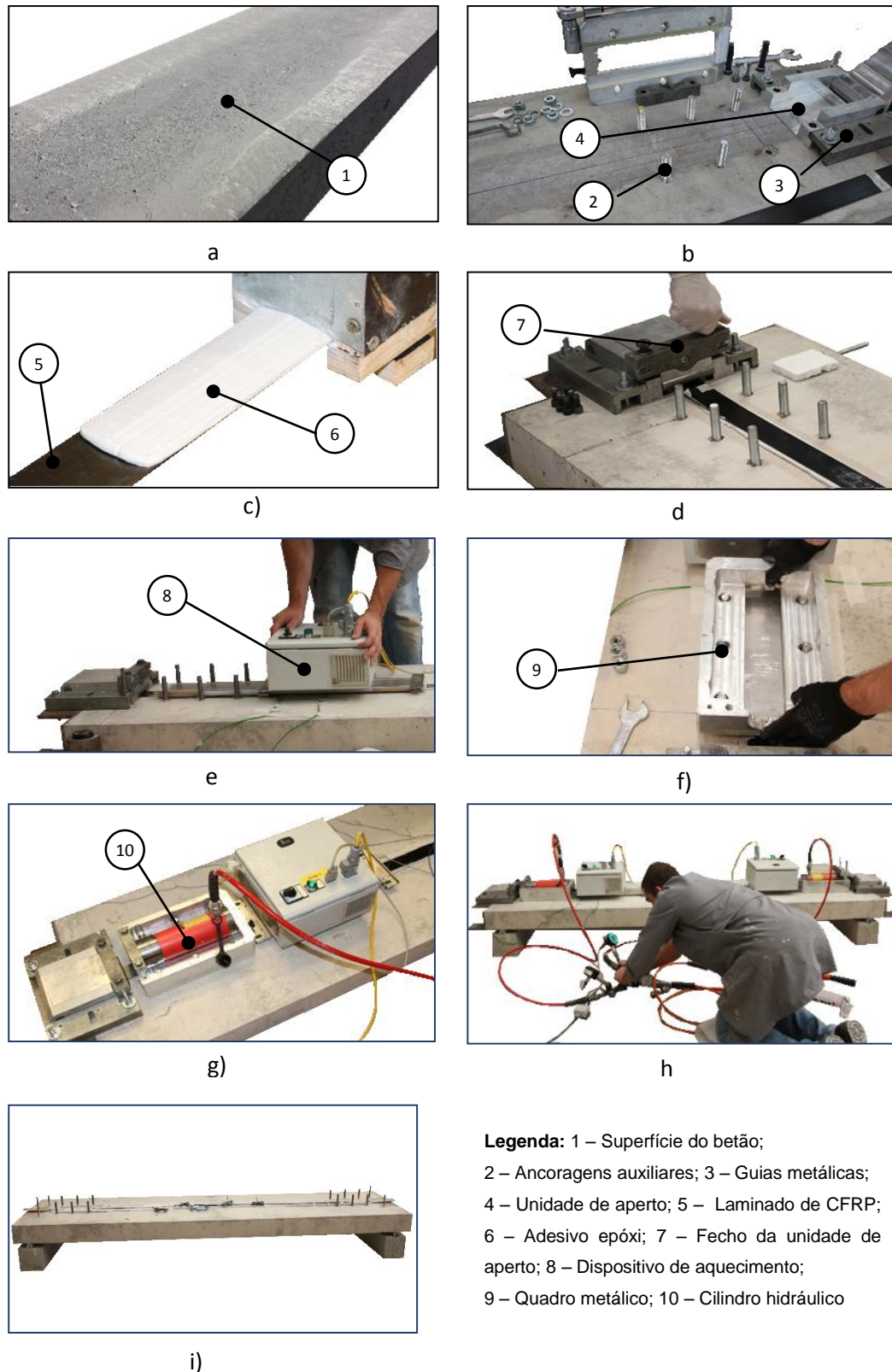


Figura 3.16: Procedimentos de aplicação do sistema GA (Teixeira, Correia, et al. 2014)

No sistema GA o processo de aplicação do reforço termina passadas três horas, enquanto que nos sistemas MA, em condições de cura normais e a uma temperatura igual ou superior a 20° C, o processo conclui-se passadas 24 horas da aplicação do laminado. Granja, Fernandes, Benedetti, Azenha, & Sena-Cruz (2015) referem que, de acordo com o fornecedor do adesivo, três dias são necessários para se obter uma cura suficiente do epóxi em condições normais de cura. Detalhes adicionais podem ser encontrados em, S&P (2010) para o sistema MA e em Michels *et al.* (2013) para o sistema de GA.

As lajes incluídas no presente programa experimental foram mantidas em ambiente de laboratório após o reforço, pelo menos um mês antes de serem ensaiadas.

Haverá também que referir que os laminados CFRP foram pré-esforçados até um valor de cerca de 0,4% ( $\epsilon_{fp}$ ) valor que está de acordo com os valores sugeridos na literatura existente (Michels, Sena-Cruz, et al. 2013). Durante a aplicação do reforço pelo método GA, a força aplicada pelos macacos hidráulicos aos laminados e a temperatura aplicada pelos dispositivos de aquecimento nos diferentes sectores foram devidamente monitorizadas.

No âmbito deste trabalho experimental, para o sistema GA foi adotada uma ancoragem com um desenvolvimento de 600 mm (zona onde foi promovida a cura rápida do epóxi). O dispositivo de aquecimento utilizado dispõe de vários setores de aquecimento com dimensões de 100x100 mm<sup>2</sup>. Deste modo adotaram-se três troços com desenvolvimento de 200 mm cada um composto por dois setores do referido equipamento.

Na Figura 3.17 são indicados os valores referentes à temperatura e os valores da força aplicada pelo cilindro hidráulico nas lajes SL50x1.4\_GA e SL80x1.2\_GA. É possível observar a evolução da temperatura ao longo do tempo nos diferentes setores de aquecimento: (i) pode-se verificar um início com um patamar de cerca de 160 °C durante um período de 15 minutos; (ii) de seguida dá-se uma diminuição exponencial nos 20 minutos seguintes; e (iii) finalmente o aquecimento é interrompido, permitindo que o adesivo epóxi arrefeça de modo a recuperar a temperatura ambiente. A redução da força de pré-esforço em cada sector da ancoragem foi de, aproximadamente, 1/3 da força de pré-esforço total aplicada. As sucessivas reduções da força de pré-esforço ocorreram 15 minutos após o início da fase de arrefecimento do epóxi (Teixeira, Correia, et al. 2014).

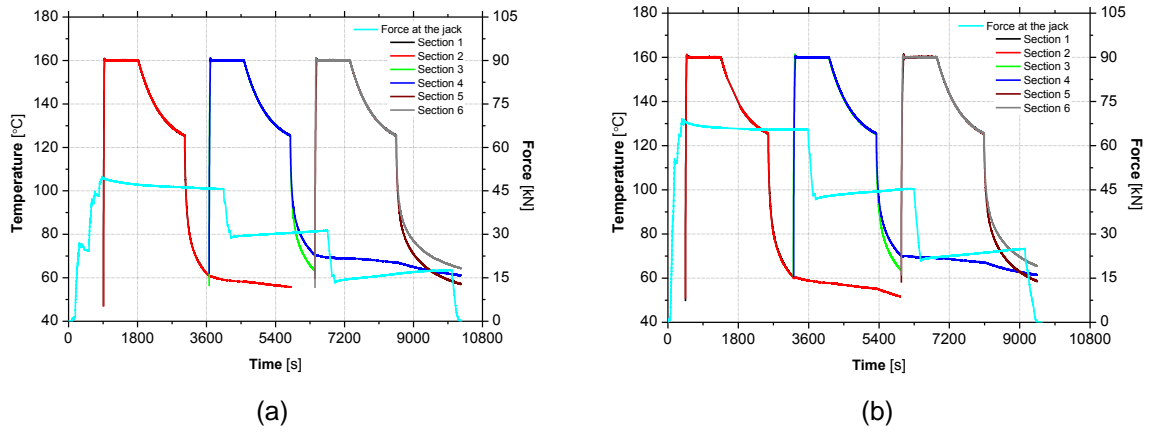


Figura 3.17: Evolução da temperatura e da força instalada no laminado de CFRP para o caso do método do gradiente (GA): (a) SL50×1.4\_GA; (b) SL80×1.2\_GA (Teixeira, Correia, et al. 2014).

### 3.3 CONCLUSÕES

No domínio do estudo do comportamento de estruturas de betão armado reforçadas com laminados CFRP, é recomendado a realização de ensaios de caracterização material, nomeadamente, do betão, do aço das armaduras passivas, do laminado CFRP e do epóxi.

Relativamente à caracterização do betão, foram executados ensaios de compressão monotónicos uniaxiais. Os resultados obtidos permitiram classificar o betão como pertencente à classe C40/50, sendo estes os resultados esperados.

A caracterização do aço das armaduras passivas foi realizada através de ensaios de tração uniaxial. Após a análise dos resultados é possível concluir que: (i) de uma forma geral para cada tipo de armadura os resultados são bastante similares, indicando que se trata de material do mesmo lote; (ii) a armadura  $\phi 8$  apresenta um patamar de cedência, enquanto que no  $\phi 6$  tal não é possível de observar; (iii) a tensão na rotura do  $\phi 6$  é próxima dos 670 MPa, enquanto que no caso do  $\phi 8$  é de cerca de 600 MPa.

Os laminados CFRP foram caracterizados através de ensaios de tração uniaxiais. Os resultados provenientes destes ensaios permitem concluir que este material não apresenta patamar de cedência, exibindo apenas comportamento linear e elástico até à rotura, apresentando uma capacidade máxima de carga entre 2450 e 2950 MPa.

O adesivo epóxi utilizado foi o adesivo com a designação comercial S&P 220 Resin. Os valores que descrevem o comportamento deste material foram obtidos por meio de ensaios de tração uniaxiais, indicando uma resistência máxima de 24.4 MPa e um módulo de elasticidade de 6.3 GPa.

Todas as lajes foram devidamente reforçadas e preparadas para serem submetidas aos ensaios de flexão. As lajes reforçadas com laminados CFRP pré-esforçados através da técnica GA foram especialmente monitorizadas ao longo de todo o processo de cura das ancoragens, sendo devidamente controlada a temperatura e a força aplicada nos macacos hidráulico.



## CAPÍTULO 4

### APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

#### 4.1 COMPORTAMENTO À ROTURA

Nas Tabela 4.9 e Tabela 4.9 estão apresentados os principais resultados principais obtidos para todas as lajes que constituíam a campanha experimental: (início de fendilhação ( $\delta_{cr}$ ,  $F_{cr}$ ), início da plastificação da armadura longitudinal ( $\delta_y$ ,  $F_y$ ) e na rotura ( $\delta_{max}$ ,  $F_{max}$ ). Os valores entre parenteses correspondem à variação de cada parâmetro quando comparados com a laje referência (REF, REF1, REF2).

Tabela 4.8: Resumo campanha experimental das lajes da série 2600

Lajes 2600	Início da fendilhação		Início da cedência		Capacidade máxima		$\epsilon_{fmax}$ [ $\times 10^{-3}$ ]	MR
	$\delta_{cr}$ [mm]	$F_{cr}$ [kN]	$\delta_y$ [mm]	$F_y$ [kN]	$\delta_{max}$ [mm]	$F_{max}$ [kN]		
REF1	2.47	11.04	15.74	21.50	100.27	25.42	-	-
SL50×1.4_GA	2.25	23.84	18.86	48.35	34.39	56.02	10.29	ED
	(-8.9%)	(116%)	(19.8%)	(124.9%)	(-65.7%)	(120.4%)	-	
SL50×1.4_MA	2.25	22.07	17.80	44.32	69.84	61.76	11.97	ED
	(-8.9%)	(100%)	(13.1%)	(106.1%)	(-30.35%)	(143%)		
SL50×1.4_EBR	1.64	14.73	17.00	33.30	20.47	35.06	4.64	ED
	(-33.6%)	(33.4%)	(8%)	(54.9%)	(-79.19%)	(37.9%)	-	
SL50×1.2_MA	2.53	22.81	20.57	44.89	73.23	59.09	12.53	ED
	(2.43%)	(106.6%)	(30.7%)	(108.8%)	(-26.97%)	(132.5%)	-	
REF2	2.4	11.12	15.96	22.90	102.32	26.90	-	-
SL80×1.2_GA	2.88	28.56	20.31	58.31	30.61	66.21	8.96	ED
	(20%)	(156.8%)	(27.3%)	(154.6%)	(-70.1%)	(146.5%)	-	
SL80×1.2_MA	2.51	28.71	18.43	58.67	48.62	72.58	10.13	ED
	(4.5%)	(158.2%)	(15.5%)	(156.2%)	(-52.5%)	(169.8%)	-	

Notas:  $\delta$  = Deslocamento a meio vão; F = Força aplicada; CR = Início da fendilhação; Y = Início da cedência das armaduras longitudinais; MAX = Capacidade máxima; MR = Modo de rotura; ED = Destacamento do laminado de CFRP em relação ao substrato de betão.



Tabela 4.9: Resumo campanha experimental das lajes da série S2200

Lajes 2200	Início da fendilhação		Início da cedência		Capacidade máxima		Extensão na rotura		MR
	$\delta_{cr}$ (mm)	$F_{cr}$ (kN)	$\delta_y$ (mm)	$F_y$ (kN)	$\delta_{max}$ (mm)	$F_{max}$ (kN)	Betão (%)	CFRP (%)	
REF	0.60	13.82	10.23	27.50	-	-	-	-	-
SL50x1.4_EBR	0.75 (25%)	15.14 (9.5%)	12.00 (17.3%)	39.07 (42%)	16.55	43.30	1.25	4.44	ED
SL50x1.4_GA	1.48 (147%)	25.12 (82%)	13.35 (30.5%)	53.36 (94%)	21.33	61.00	1.37	9.56	ED
SL50x1.4_MA	1.33 (122%)	26.25 (90%)	12.75 (24.6%)	53.61 (95%)	48.91	75.30	2.02	13.36	ED

Nos ensaios das lajes de referência não foi possível observar a rotura, visto que o ensaio foi interrompido para uma deformação de 100 mm a meio vão, por limitações técnicas dos LVDT's usados. Nas lajes reforçadas a rotura deu-se por destacamento do laminado em relação ao substrato do betão.

Na Figura 4.1 e Figura 4.2 é apresentado a relação entre a força aplicada e a deformação a meio vão de todas as lajes ensaiadas. Na Figura 4.3 representa-se a evolução das extensões no CFRP com a carga aplicada, enquanto que na Figura 4.4 apresenta-se a evolução da curvatura para um dado momento aplicado às lajes.

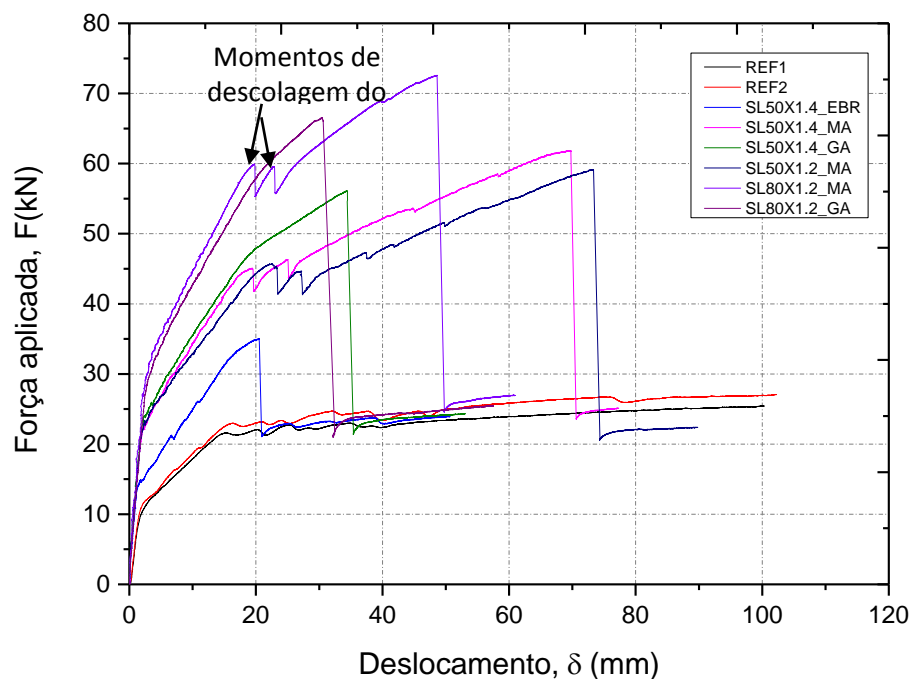


Figura 4.1: Relação entre a carga total e o deslocamento a meio vão das lajes 2600

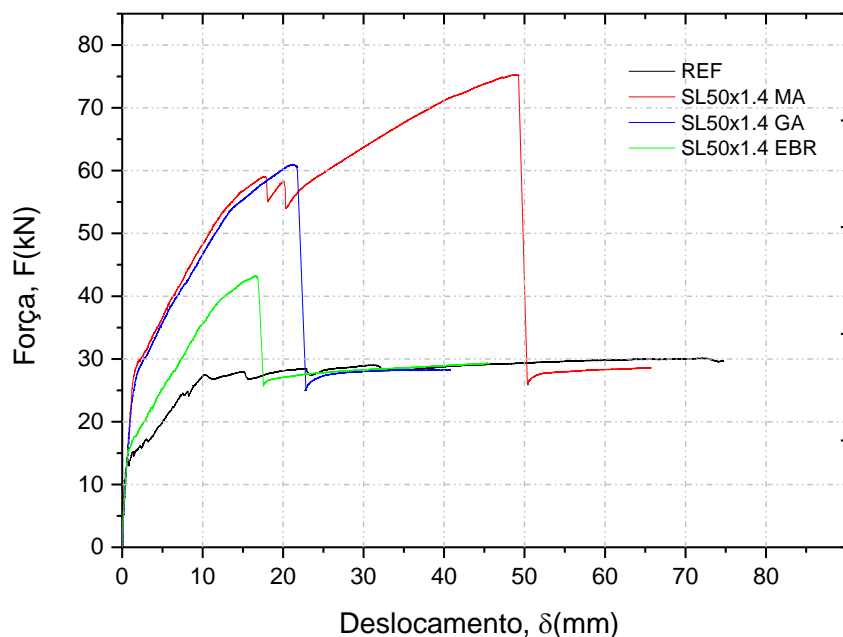


Figura 4.2: Relação entre a carga total e o deslocamento a meio vão das lajes 2200

A partir dos resultados obtidos nas lajes com diferentes comprimentos podemos concluir que:

- As lajes reforçadas com os laminados CFRP mostram uma diminuição na deformação, em consequência do aumento de rigidez de todo o sistema;
- As lajes EBR apresentaram um incremento de 60 a 70 % da capacidade máxima de carga quando comparada com as lajes de referência. Resultados semelhantes foram apresentados por Dong-suk, Sun-Kyu, & Kenneth (2009).
- A presença de pré-esforço teve uma contribuição residual no aumento de capacidade de carga (comparativamente com as lajes EBR e REF) durante a fase elástica. No entanto, apresentam valores de capacidade de carga consideravelmente superiores nos momentos de início de fendilhação e cedência das armaduras longitudinais, significativamente superiores;
- Comparando os sistemas MA e GA, observa-se um comportamento em serviço bastante similar até um certo nível de carga que resulta no descolamento prematuro do laminado, onde a partir daí o sistema MA mostra-se um pouco mais eficaz que o GA;
- As lajes MA apresentaram duas fases de descolagem do laminado. Temos assim um comportamento inicial do laminado perfeitamente colado até uma certa carga, que depois é alterado por dois momentos de descolagem, sendo depois apenas seguro pelas chapas de ancoragens (ver Figura 4.1). Este comportamento foi também observado por Dong-suk et al., (2009) e (You, Choi, and Kim 2012). Na resposta das lajes de menor comprimento, observa-se

a rotura da laje GA no momento das descolagens da laje MA (uma vez que quando se dá o início do descolamento não existe nenhum elemento de ancoragem externo que mantenha fixa a extremidade do laminado), verificando-se a influência das chapas de ancoragem na capacidade máxima de carga do sistema, após a descolagem do laminado.

- É ainda possível visualizar que o descolamento do laminado se dá para uma força ligeiramente superior à força de cedência das armaduras, o que pode ser explicado pelo facto de a partir deste ponto, os incrementos de carga serem exclusivamente suportados pelo laminado, uma vez que a contribuição das armaduras é reduzida por se já encontrarem em regime plástico.
- Todas as lajes reforçadas tiveram um modo de rotura similar, que consistiu na descolagem do laminado das extremidades para a zona intermédia;
- Nos laminados pré-esforçados observou-se valores de extensão consideravelmente elevados;
- A performance dos laminados com diferentes espessuras foi bastante similar. Tal facto não se verificou nos laminados com diferentes larguras, podendo-se concluir que este parâmetro tem bastante influência na performance do sistema.

De forma a conseguir uma análise comparativa da rigidez das lajes, determinou-se a rigidez correspondente às diferentes fases observadas que constituíam a resposta da carga aplicada face ao deslocamento a meio vão obtido, sendo apresentadas nas Tabela 4.10 e Tabela 4.11, nomeadamente: a fase elástica ( $K_I$ ), fase fendilhada ( $K_{II}$ ) e a fase correspondente à plastificação das armaduras de flexão ( $K_{III}$ ).

A rigidez foi determinada de acordo com a seguinte expressão:

$$\Delta F = K \times \Delta \delta \quad (4.1)$$

onde  $\Delta F$  é a variação da carga aplicada nos diferentes troços (kN),  $K$  é rigidez (kN/m) e  $\Delta \delta$  a variação dos deslocamentos nos diferentes troços (m). Os valores utilizados no cálculo da rigidez das diferentes fases foram os apresentados na tabela 4.1 e 4.2.

Tabela 4.10: Variação da rigidez entre as diferentes fases exibidas pelas lajes com comprimento 2600

Lajes	$K_I$ [kN/m]	$K_{II}$ [kN/m]	$K_{III}$ [kN/m]
REF 1	4469.6	788.2	46.41
SL50x1.4_EBR	8981.7 (101%)	1209.1 (53.4%)	498.6 (974%)
SL50x1.4_MA	9808.9 (119%)	1430.9 (82%)	396.7 (755%)
SL50x1.4_GA	10595.6 (137%)	1475.6 (87.2%)	493.9 (964%)
SL50x1.2_MA	9015.8 (102%)	1223.9 (55.3%)	269.7 (481%)

REF 2	4633.3	868.7	46.32
SL80x1.2_MA	11438.2 (147%)	1881.9 (117%)	462.3 (898%)
SL80x1.2_GA	9916.7 (114%)	1706.8 (96.5%)	767 (1556%)

Nota: Os valores entre parenteses correspondem à variação de cada parâmetro quando comparados com as lajes referências (REF1, REF2).

Tabela 4.11: Variação da rigidez entre as diferentes fases exibidas pelas lajes com comprimento 2200

Lajes	$K_I$ [kN/m]	$K_{II}$ [kN/m]	$K_{III}$ [kN/m]
REF	23033.3	1420.56	-
SL50x1.4_EBR	20459.5 (11.6%)	2127.1 (49.7%)	929.7
SL50x1.4_MA	19740.6 (14.7%)	2395.8 (68.7%)	-
SL50x1.4_GA	18887.2 (18.4%)	2395.8 (67.5%)	599.8

Nota: Os valores entre parenteses correspondem à variação de cada parâmetro quando comparados com a laje referência (REF).

Dos diferentes valores de rigidez acima calculados podemos concluir que:

- Na fase linear-elástica as lajes reforçadas de comprimento de 2.6 metros apresentam uma rigidez duas vezes superior à rigidez das lajes de referência. O valor referentes à rigidez da laje de referência de 2.2 metros na mesma fase é bastante elevado e incoerente pelo que não foi comparado com as outras lajes. É possível também apontar uma diferença considerável entre a rigidez da laje 50x1.4 EBR e as lajes 50x1.4 GA e MA tendo as ultimas uma rigidez superior em 17% e 10% respetivamente nas lajes 2600 metros;

-Observou-se um aumento da rigidez nos laminados de maior espessura nas lajes de maior comprimento;

- No tramo desde o início da fendilhação até ao início da plastificação das armaduras, observa-se igualmente uma rigidez bastante superior nas lajes reforçadas quando comparadas com as lajes de referência. É possível também constatar que a variação na secção do laminado tem uma influência considerável na rigidez global do sistema. As lajes 50x1.4 GA apresentam uma rigidez superior comparativamente as lajes 50x1.4 MA

- No último tramo verifica-se a maior incremento de rigidez entre as lajes de referência e as lajes reforçadas, chegando a atingir variações acima de 1000% nas lajes de 2600, o que mostra a elevada ductilidade da laje de referencia quando comparada com as lajes reforçadas.

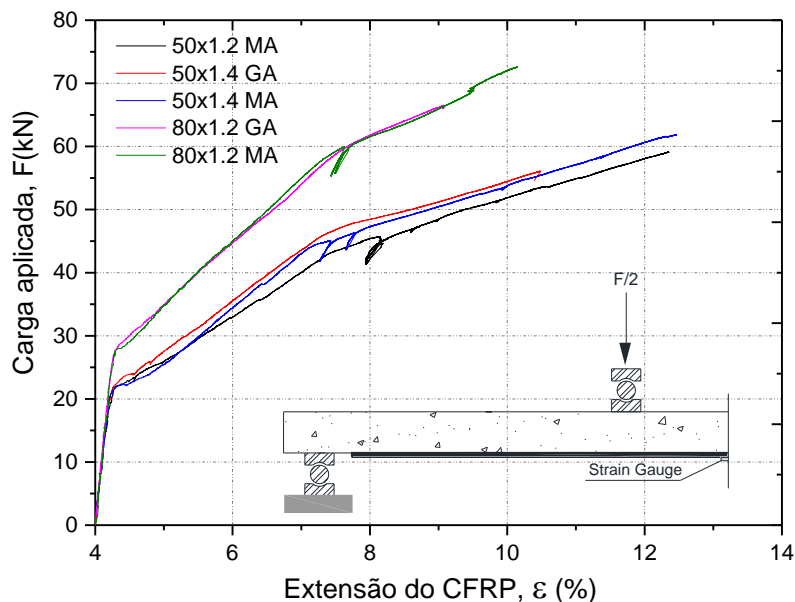


Figura 4.3: Carga aplicada *versus* extensão do CFRP

A partir da Figura 4.3 é possível concluir que:

- Para um dado valor de extensão no CFRP verifica-se uma capacidade resistente superior nos laminados com maior secção transversal;
- Os patamares lineares e elásticos de todas as lajes são colineares em resultado do comportamento do material CFRP;
- Até ao início da fissuração, o laminado tem uma participação marginal, com a particularidade de este aumentar para laminados com maior área de secção transversal. Tal pode ser constatado comparando a resposta das lajes 80x1.2 MA ou GA com as restantes lajes;
- Com o aumento da secção dos laminados verifica-se uma diminuição considerável da ductilidade;
- A resposta das lajes com os diferentes tipos de ancoragem (MA e GA) é bastante similar, diferenciando a carga e extensão máximas que ocorrem para valores inferiores nos sistemas GA.
- É possível observar-se nas lajes MA quedas na curva tanto a nível de carga aplicada com de extensão que são apontadas aos momentos de descolagem do laminado.

Os gráficos carga aplicada *vs.* extensão do CFRP e momento *vs.* Curvatura não foram obtido para as lajes de comprimento igual a 2200 metros devido a problemas técnicos nos extensómetros pelo que não vão ser apresentados.

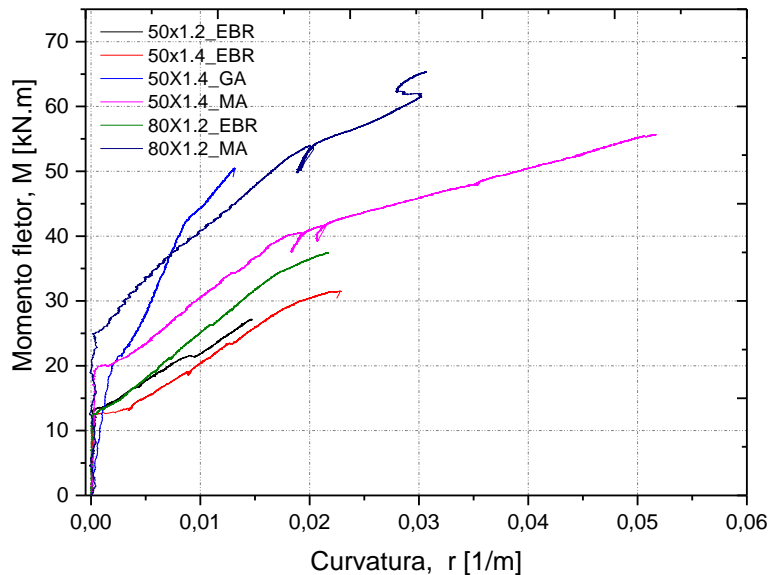


Figura 4.4: Momento fletor *versus* curvatura

Do gráfico momento *vs.* curvatura podemos concluir que:

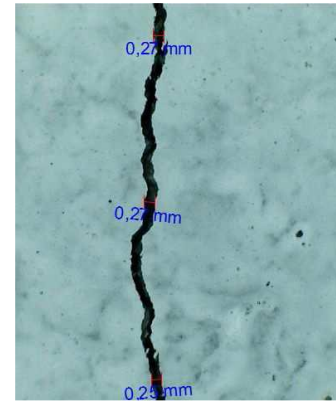
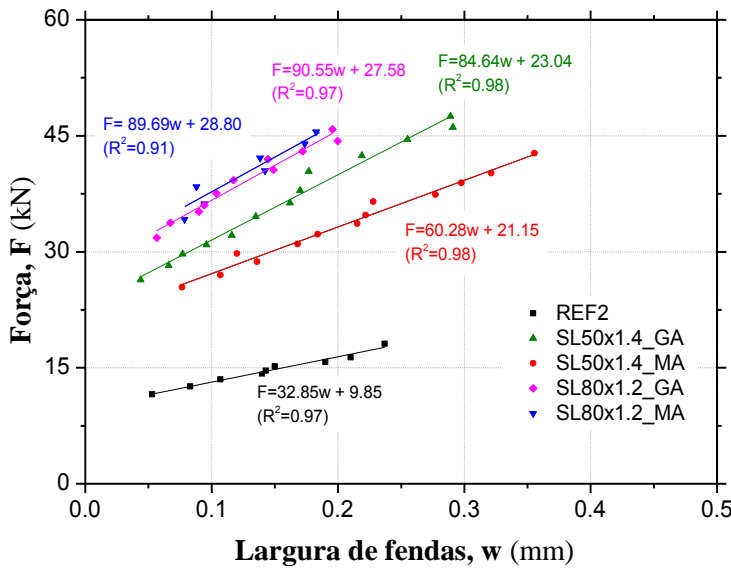
- Como era esperado, as lajes reforçadas com o sistema EBR apresentaram um momento máximo menor comparativamente com as lajes com laminados pré-esforçados;
- As lajes com laminados pré-esforçados apresentaram maior momento para a mesma curvatura;
- As lajes reforçadas com o sistema MA apresentaram uma maior capacidade de rotação comparativamente com as lajes reforçadas com o sistema GA;
- Relativamente às lajes reforçadas com os sistemas MA, conclui-se que o aumento de largura do laminado utilizado aumenta o momento resistente para uma determinada curvatura, mas verifica-se uma perda na capacidade de rotação máxima.
- Neste gráfico é possível mais uma vez observar as quebras na curva associados aos momentos de descolagem. A quebra de curvatura no momento de descolagem não aconteceu na realidade sendo explicado pelo facto da curvatura ter sido calculado com base na extensão do laminado ao longo do carregamento.

## 4.2 LARGURA DE FENDAS

Os níveis de tensão a que as estruturas de betão são submetidas, em condições de utilização, são superiores à capacidade resistente de tração do betão, originando a fendilhação dos elementos estruturais. Este fenómeno deve-se ao acréscimo das solicitações atuantes na estrutura. As estruturas reforçadas com compósitos apresentam um desenvolvimento da fendilhação distinto devido à absorção das tensões de tração verificadas no betão pelos laminados. Assim, o número de fendas e o espaçamento entre elas será diferente, uma vez que a aderência entre betão e o compósito é bem mais rígido que a aderência verificada entre o aço e o betão.

Na presente dissertação, monitorizou-se a evolução da largura das fendas em todas as lajes, usando um fator de ampliação de 20x, com recurso a um microscópio USB portátil (VEHO VMS.004D), com uma resolução 640x480 *pixels*. Os dados obtidos resultaram da análise de três fendas, localizadas na zona de flexão pura em cada laje, sendo duas delas próximas dos pontos de aplicação da carga e a terceira localizada a meio vão de cada laje. Cada um dos registos gráficos foram obtidos através da média de três medições feitas ao longo da fenda.

A evolução da largura média das fendas face à carga aplicada pode ser visualizada na Figura 4.5. Pode-se concluir que, a evolução das fendas das lajes reforçadas à medida que a carga aumenta é, notoriamente, inferior quando comparadas com a laje de referência (REF2). Verifica-se que a secção do reforço utilizado influencia a abertura das fendas sendo mais limitativo quando maior for a área do mesmo. Seria de esperar que os resultados entre as lajes reforçadas com os sistemas MA e GA fossem similares, uma vez que a resposta de ambos foi idêntica em termos de carga aplicada vs. deformação, o que não se verifica nos laminados 50x1.4.



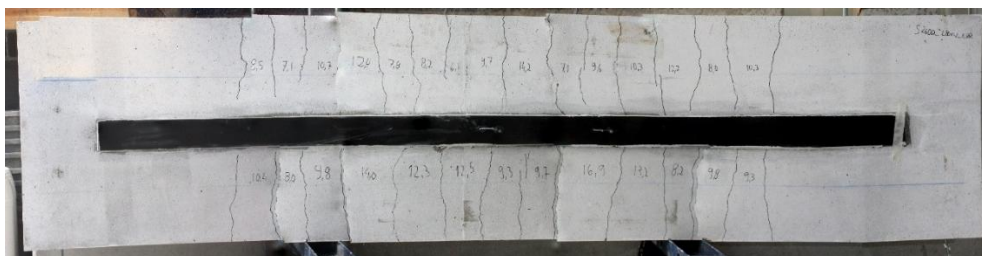
(a)

(b)

Figura 4.5: (a) Força vs. Largura de fendas; (b) Medição microscópica de uma fenda (Teixeira, Luís, et al. 2014)

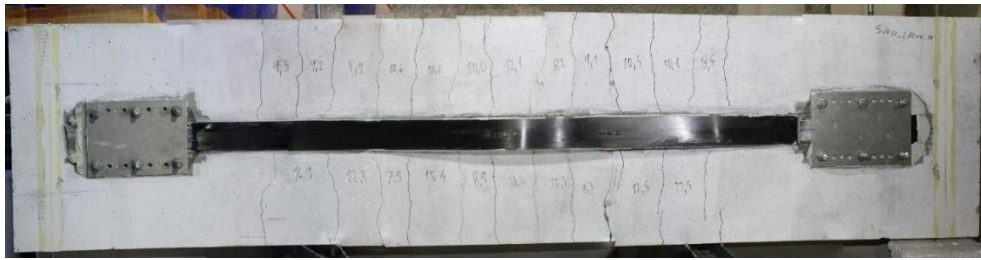
### 4.3 ESPAÇAMENTO ENTRE FENDAS

No presente estudo foi também avaliado o espaçamento entre fendas existente em todas as lajes no final de cada ensaio monotônico. Na Figura 4.6 é apresentado o padrão de fendilhação das diferentes lajes testadas. Foram obtidos para cada laje o espaçamento médio sendo posteriormente comparados através do gráfico de barras apresentado na Figura 4.7. Por análise da Figura 4.7 conclui-se que o espaçamento entre fendas diminui com a aplicação de laminados de CFRP pré-esforçados. As lajes EBR apresentam uma diminuição do espaçamento entre fendas residual, quando comparado com as lajes de referência (REF1 e REF2).

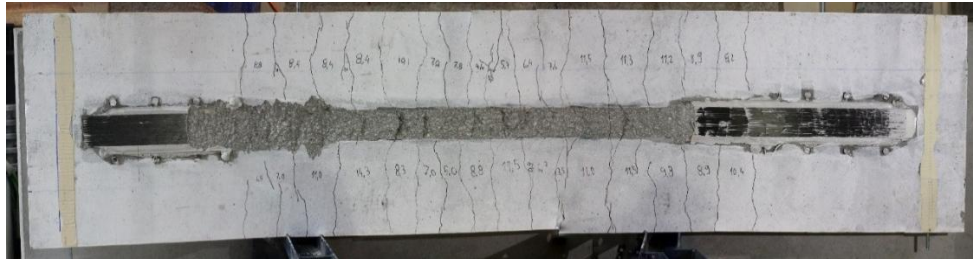


(a)





(b)



(c)

Figura 4.6: Padrão de fendilhação (a) SL80x1.4\_EBR; (b) SL80x1.4\_MA; (c) SL80x1.4\_GA

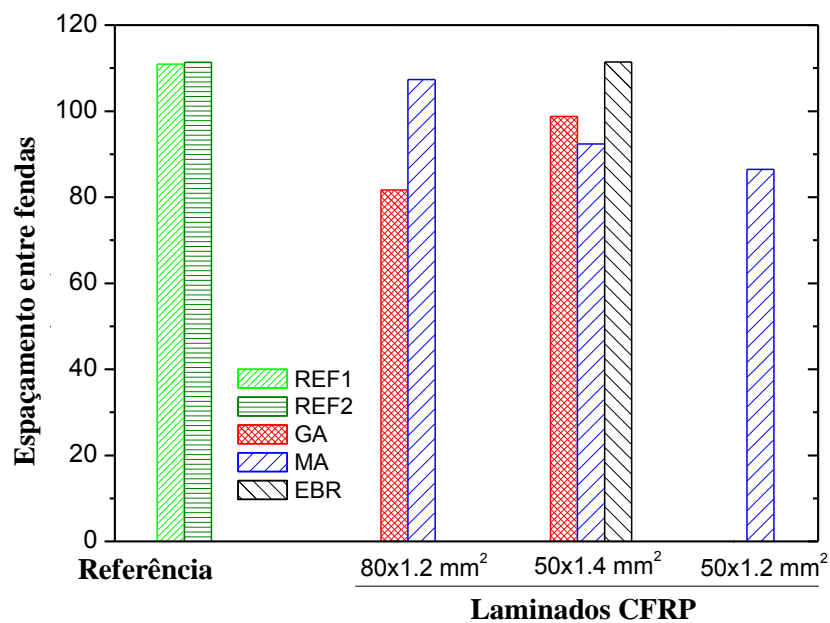


Figura 4.7: Espaçamento entre fendas nas lajes ensaiadas (Teixeira, Luís, et al. 2014)

#### 4.4 CONCLUSÕES

No presente estudo, um conjunto de 12 lajes foi submetido a ensaios de flexão até à rotura. Desses ensaios, foram obtidas todas as informações dos comportamentos respetivos a cada laje necessários à realização dos gráficos força vs. deslocamento, força vs. extensão no laminado e momento vs. curvatura. Foi ainda monitorizada a abertura de fendas ao longo do

carregamento apresentada no gráfico força vs. abertura de fendas. Através da análise dos gráficos concluiu-se que: (i) as lajes reforçadas apresentaram uma rigidez superior comparativamente com as lajes de referência (exceto na fase linear elástica). (ii) as lajes reforçadas com laminados pré-esforçados apresentam um elevado incremento de capacidade de carga quando comparadas com as lajes de reforçadas passivamente (EBR); (iv) as lajes reforçadas com o sistema MA e GA apresentam um comportamento similar até a carga de descolamento do laminado. No entanto, as lajes reforçadas com o sistema GA colapsam quando se atinge a referida carga, i.e., quando se atinge a carga de descolamento do laminado. Pelo contrário, tal facto não ocorre nas lajes reforçadas com o sistema MA devido à ação ativa das ancoragens metálicas, resultando numa carga de colapso superior; (v) todos os modos de rotura ocorreram por descolagem do laminado; (vi) a largura do laminado apresentou uma determinada influência no desempenho do sistema de reforço ao contrário da espessura que revelou uma influência residual; (vii) a abertura das fendas nas lajes reforçadas deu-se para níveis de carga bastante superiores quando comparados com a abertura de fendas constatada nas lajes de referência; (viii) foi ainda analisado o espaçamento entre fendas posteriormente aos ensaios onde se constatou que o espaçamento entre fendas era inferior nas lajes reforçadas com laminados pré-esforçados comparativamente com as lajes EBR e as lajes de referência.



## CAPÍTULO 5

### SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

#### 5.1 INTRODUÇÃO

Desde sempre que é de extrema importância o desenvolvimento de metodologias capazes de simular, eficazmente, o comportamento de elementos de BA, isto porque para além de terem um carácter económico, resultante dos custos diretos que este programa tem quando comparado com programas experimentais, permitem uma análise eficiente em várias situações que seriam impensáveis, e em alguns casos impossíveis, de se obter por vias experimentais. O desenvolvimento e a aplicação de modelos numéricos no dimensionamento do reforço de elementos de BA vem assim simplificar todo o processo, revelando extrema importância na introdução de materiais compósitos na construção.

De modo a aferir a capacidade das ferramentas numéricas existentes na simulação, os ensaios monotónicos descritos no capítulo 3 e cujos resultados se encontram detalhados no capítulo 4, foram simulados através do programa SECTION, da autoria de (J. Sena-Cruz 2013) para análise secções de BA reforçadas com compósitos FRP. O rigor das formulações foi avaliado através da comparação entre os resultados obtidos pelo SECTION e os resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados, anteriormente apresentados.

#### 5.2 DESCRIÇÃO DO SOFTWARE

O SECTION é um *software* que tem por base um modelo de fibras que permite efetuar as análises da secção transversal, (Figura 5.8). Como hipóteses de cálculo assume-se que as secções se mantêm planas antes e após a deformação (hipótese de Navier-Bernoulli) e as deformações seguem uma distribuição linear em toda a secção transversal considerada. O *software* considera ainda uma ligação perfeita entre todos os materiais que constituem a secção. A secção transversal é discretizada em elementos finitos isoparamétricos de 4 nós, dando liberdade à análise de secções com formas e tamanhos irregulares (J. Sena-Cruz 2013). Cada elemento finito é devidamente simulado através da aplicação de leis constitutivas e representativas do comportamento do respetivo material. Isto revela-se bastante útil, uma vez que torna o programa bastante flexível na definição do comportamento dos diferentes materiais presentes na secção transversal.

Na avaliação dos integrais de cada elemento é utilizada uma integração numérica de Gaus-Legendre. Os reforços da secção de betão (p.e. aço, CFRP, etc) são simulados através de elementos discretos (pontos) posicionados no centro geométrico de cada elemento.

Ao impor uma força axial e variando as curvaturas (em uma ou nas duas direções principais), obtém-se a relação entre os momentos fletores e as curvaturas.

O *software* possui um algoritmo de determinação da deformada por flexão de uma peça linear, com secção transversal constante e igual à discretizada no modelo de secção, para uma determinada configuração de carga e condições de apoio (J. Sena-Cruz 2013).

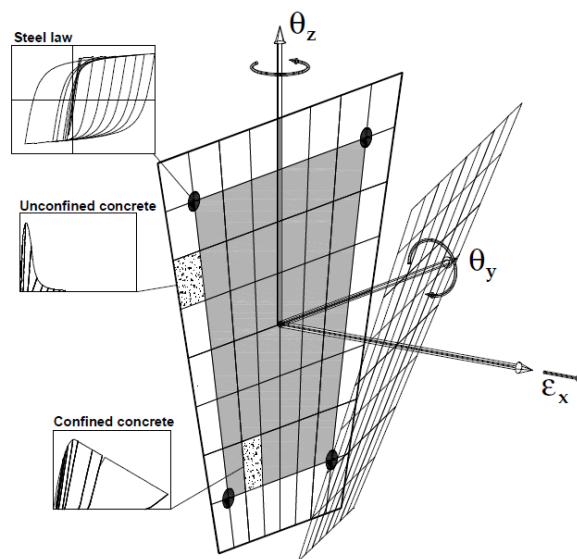


Figura 5.8: Modelo do SECTION (J. Sena-Cruz 2013)

Para utilização do *software* é necessário desenvolver um ficheiro de dados que contém toda a informação necessária para a realização da análise. O pós-processador do *software* apresenta diferentes tipos de *output* que permitem uma análise detalhada dos resultados obtidos (J. Sena-Cruz 2013).

Para além do comportamento elástico linear, a ferramenta de cálculo possui diversos modelos não lineares de material (NLMM) que são apresentados e descritos na

Tabela 5.12. Apesar de serem recomendados para determinados materiais, estes modelos são versáteis e podem ser utilizados para qualquer tipo de material que o utilizador entenda como válidos (J. Sena-Cruz 2013).

Tabela 5.12– Modelos não lineares de materiais (J. Sena-Cruz 2013).

Nome do modelo	Materiais Recomendados	Descrição
NLMM201	Aço e FRP	Bi-linear +Lei exponencial
NLMM202	Betão sujeito à compressão	Lei Poposta pelo ModelCode 1990
NLMM203	Betão sujeito à tração e compressão	Lei Multi-linear
NLMM204	Betão sujeito à compressão	Lei proposta pelo Eurocódigo 2

No âmbito desta dissertação, o desenvolvimento das simulações numéricas efetuadas na definição do aço e do CFRP utilizou-se o modelo NLMM201, enquanto que para o betão à compressão utilizou-se o modelo NLMM202 e para o betão à tração utilizou-se o modelo NLMM203 (J. Sena-Cruz 2013). Abaixo serão descritos os três modelos supracitados.

### 5.2.1 MODELO NLMM201

As propriedades do material do aço de reforço são, normalmente, determinadas através de ensaios à tração normalizados. O diagrama de tensão vs. extensão é obtido pela substituição por uma relação idealizada como se pode observar na Figura 5.9. A Figura 5.9 apresenta o modelo constitutivo uniaxial dos varões de acordo com o modelo NLMM201 (J. Sena-Cruz 2013).

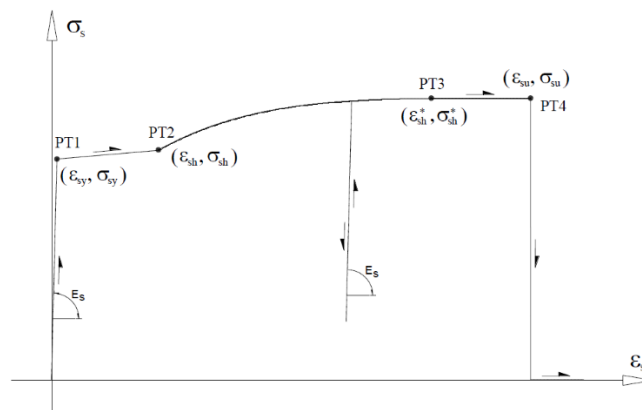


Figura 5.9: Modelo Constitutivo uniaxial dos varões (J. Sena-Cruz 2013)

A curva (válida em compressão ou à tração) é composta por 5 ramos (ver Equação 5.1). São utilizados 4 pontos e o parâmetro  $p$  para definir os 5 ramos da curva: PT1 ( $\epsilon_{sy}, \sigma_{sy}$ ), PT2

( $\varepsilon_{sh}, \sigma_{sh}$ ), PT3 ( $\varepsilon_{sh}^*, \sigma_{sh}^*$ ) e PT4 ( $\varepsilon_{su}, \sigma_{su}$ ). O valor do parâmetro  $p$  pode variar entre 1 e 4. Os ramos lineares são definidos pela inclinação de  $E_s$  (J. Sena-Cruz 2013).

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s & se \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sy} \\ E_{sy}(\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}) + \sigma_{sh1} & se \varepsilon_{sy} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sh} \\ \sigma_{sh}^* + (\sigma_{sh} - \sigma_{sh}^*) \left( \frac{\varepsilon_{sh}^* - \varepsilon_s}{\varepsilon_{sh}^* - \varepsilon_{sh}} \right) p & se \varepsilon_{sh} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sh}^* \\ \sigma_{sh}^* + \left( \frac{\sigma_{su} - \sigma_{sh}^*}{\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh}^*} \right) (\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}^*) & se \varepsilon_{sh}^* < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su} \\ 0 & se \varepsilon_s > \varepsilon_{su} \end{cases} \quad (5.2)$$

$$E_s = \frac{\sigma_{sy}}{\varepsilon_{sy}} \quad (5.3)$$

Onde,

$$E_{sy} = \frac{(\sigma_{sh} - \sigma_{sy})}{(\varepsilon_{sh} - \varepsilon_{sy})}$$

De acordo com os valores obtidos na caracterização do aço utilizado no programa experimental, foram utilizados os seguintes pontos na simulação do material (Tabela 5.13). Estes pontos estão apresentados graficamente na Figura 5.10.

Tabela 5.13: Comportamento aço  $\phi 6$  e  $\phi 8$

		PT1	PT2	PT3	PT4
<b><math>\phi 8</math></b>	$\sigma$ (MPa)	518.4	527.8	601	611.8
	$\varepsilon$ (‰)	4.9	18.9	64	76.4
<b><math>\phi 6</math></b>	$\sigma$ (MPa)	510.4	537	664.8	664.8
	$\varepsilon$ (‰)	2.8	4.95	35.8	51.3

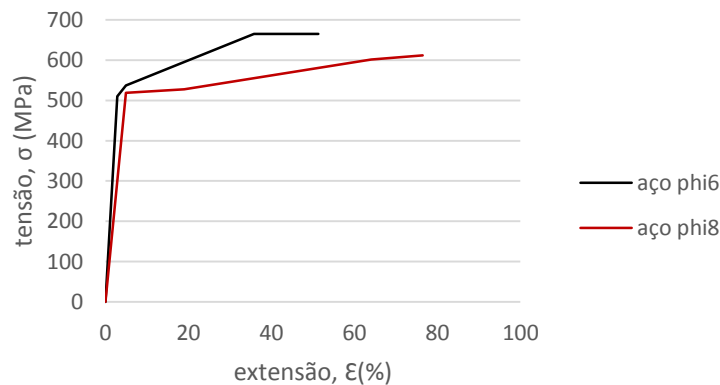


Figura 5.10: gráfico tensão vs. Deformação do ensaio de tração direta dos varões com diferente espessura.

### 5.2.2 MODELO NLMM202

A resposta típica, tensão-extensão, de um provete de betão submetida a compressão uniaxial, pode ser observada na Figura 5.11.

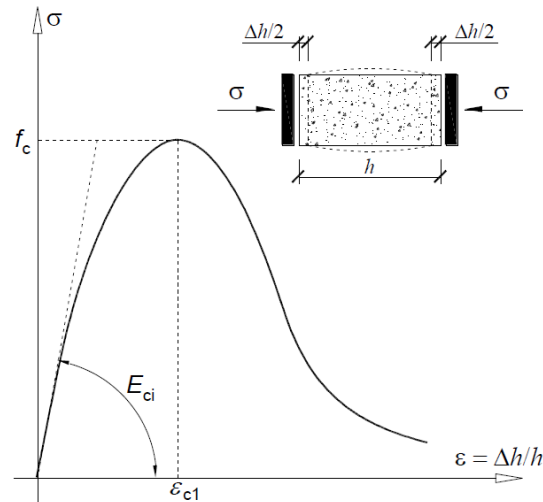


Figura 5.11: Resposta tensão-extensão de uma amostra de betão sujeita a um carregamento de compressão uniaxial (J. Sena-Cruz 2013).

Pela análise da Figura 5.11, verifica-se que se atingir cerca de 30% do valor da resistência à compressão, o betão tem um comportamento linear mas, a partir deste nível de tensão até à carga de pico observa-se uma diminuição gradual da rigidez. A rigidez torna-se negativa, a partir do valor da carga de pico, e o ramo descendente da curva caracteriza o comportamento de amolecimento do betão quando submetido a um carregamento de compressão uniaxial (J. Sena-Cruz 2013). A resistência à compressão do betão depende do atrito desenvolvido nos pratos da prensa de ensaio e da esbelteza do provete, ou seja, da relação  $h/d$ , onde  $d$  é o diâmetro quando este tem a forma de um cilindro ou a largura quando o mesmo tem a forma de um prisma e  $h$  a altura, (van Mier *et al.* 1997). Quando há uma diminuição da relação  $h/d$ , i.e., quando existe atrito entre os pratos da prensa de ensaio, dá-se um aumento da resistência à compressão do betão. Por outro lado, quando o atrito entre os pratos e o provete é baixo, a resistência à compressão é independente da esbelteza da amostra, quer esta tenha forma cilíndrica ou prismática. O ramo de pré-pico da curva tensão-extensão de compressão é também independente da relação  $h/d$  quando são utilizados pratos de baixo atrito. Relativamente à ductilidade, independentemente do sistema de carregamento, no ramo de pós-pico aumenta notoriamente com a diminuição da relação  $h/d$ .



Van Mier et al. (1997) indica que o comportamento pós pico aparenta ser uma mistura do comportamento estrutural e do material.

No modelo NLMM202 foi implementada a lei proposta pelo CEB-FIP Model Code 2010, sendo esta composta por dois ramos, como indicado na Equação 5.3, terminando o primeiro tramo no ponto cuja extensão é igual a  $\epsilon_{c,lim}$  como se pode ver na Figura 5.12 (J. Sena-Cruz 2013).

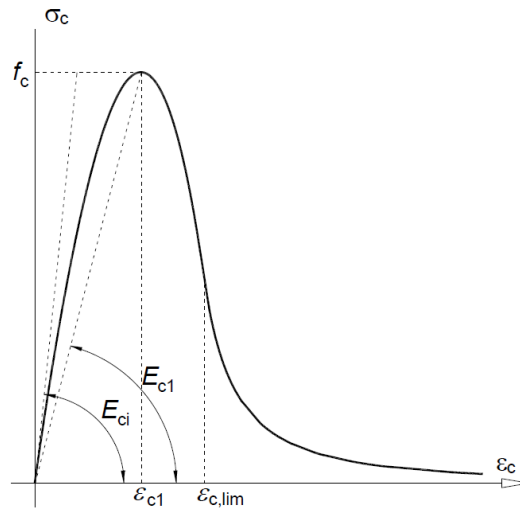


Figura 5.12: Lei do betão sujeito à compressão proposta pelo CEB-FIP Model Code 1990

Os parâmetros usados na lei proposta pelo CEB-FIP Model Code 1990 são os seguintes:

$E_{ci}$  – Modulo de elasticidade inicial;

$f_c$  – Resistência à compressão do betão;

$\epsilon_{ci}$  – Extensão da tensão de pico.

$$\sigma_c = \begin{cases} f_c \cdot \frac{\frac{E_{ci}}{E_{c1}} \cdot \frac{E_c}{E_{c1}} - \left(\frac{E_c}{E_{c1}}\right)^2}{1 + \left(\frac{E_{ci}}{E_{c1}} - 2\right) \cdot \frac{E_c}{E_{c1}}} & \text{SE } \epsilon_c < \epsilon_{c, \text{lim}} \\ \left[ \left( \frac{1}{\frac{\epsilon_{c, \text{lim}}}{\epsilon_{c1}}} \cdot \xi - \frac{2}{\left(\frac{\epsilon_{c, \text{lim}}}{\epsilon_{c1}}\right)^2} \right) \cdot \left(\frac{E_c}{E_{c1}}\right)^2 + \left( \frac{4}{\frac{\epsilon_{c, \text{lim}}}{\epsilon_{c1}}} - \xi \right) \cdot \frac{E_c}{E_{c1}} \right] \cdot \frac{f_c}{E_{c1}} & \text{SE } \epsilon_c \geq \epsilon_{c, \text{lim}} \end{cases} \quad (5.4)$$

onde,

$$\varepsilon_{c,lim} = \left\{ \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{E_{ci}}{E_{c1}} + 1 \right) + \left[ \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{E_{ci}}{E_{c1}} + 1 \right)^2 - \frac{1}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$$

$$\xi = \frac{4 \cdot \left[ \left( \frac{\varepsilon_{c,lim}}{E_{c1}} \right)^2 \cdot \left( \frac{E_{ci}}{E_{c1}} - 2 \right) + 2 \cdot \frac{\varepsilon_{c,lim}}{E_{c1}} - \frac{E_{ci}}{E_{c1}} \right]}{\left[ \frac{\varepsilon_{c,lim}}{E_{c1}} \cdot \left( \frac{E_{ci}}{E_{c1}} - 2 \right) - 1 \right]}$$

### 5.2.3 MODELO NLMM203

Na maioria dos programas experimentais, a caracterização do betão utilizado é normalmente limitada à determinação da resistência à compressão uniaxial, que se determina com base em ensaios de compressão direta, em cilindros com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura. Através destes ensaios é possível a determinação do valor médio da resistência à compressão,  $f_{cm}$ . Com base na expressão do CEB (1993), (Equação 5.4) pode-se determinar a resistência característica à compressão (J. Sena-Cruz 2013).

$$f_{ck} = f_{cm} - 8 \tag{5.5}$$

O módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ) é definido pelo diagrama de tensão-extensão (ver Figura 5.4) de um provete sujeito a compressão uniaxial, o módulo de elasticidade,  $E_{ci}$ , pode ser determinado através da Equação 5.5 proposta pelo CEB (1993).

$$E_{ci} = 9979 \cdot f_{cm}^{1/3} \tag{5.6}$$

A Figura 5.13 apresenta o diagrama tensão-deslocamento obtido num ensaio de tração uniaxial. Verifica-se que até 90% da força máxima de tração,  $f_{ct}$ , o betão apresenta um comportamento linear e elástico. Extensões e micro-fendas começam a formar-se numa zona estreita central (zona de processo) desenvolve-se posteriormente uma macro-fenda contínua. Dá-se uma rápida redução da rigidez onde se verifica um aumento da largura das macro-fendas até que esta zona não consiga transferir qualquer tensão de tração. Na curva tensão-deslocamento, o ramo de pós-pico é geralmente denominado de ramo de amolecimento. A forma, a textura dos agregados e os efeitos ambientais têm influência na resistência à tração (J. Sena-Cruz 2013).

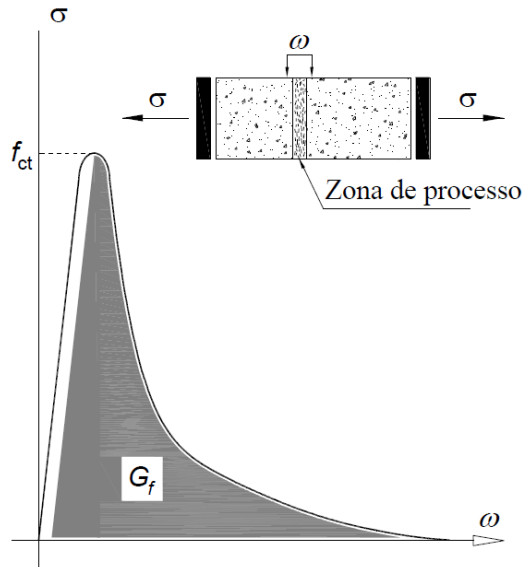


Figura 5.13: Resposta tensão-deslocamento de uma amostra de betão sujeita a um carregamento de tração uniaxial (J. Sena-Cruz 2013).

Com base na resistência à compressão característica,  $f_{ck}$ , e através das Equações 5.6 e 5.7 propostas por CEB (1993), pode estimar-se os valores da resistência à tração característica inferior,  $f_{ct,min}$ , e superior,  $f_{ct,max}$ , respetivamente.

$$f_{ct,min} = 0.20f_{ck}^{2/3} \quad (5.7)$$

$$f_{ct,max} = 0.40f_{ck}^{2/3} \quad (5.8)$$

O CEB (193) propõe também a Equação 5.8 para calcular o valor médio da resistência à tração.

$$f_{ct,min} = 0.30f_{ck}^{2/3} \quad (5.9)$$

onde  $G_f$ , é a energia de fratura de betão simples, i.e., é a energia necessária para que se desenvolva uma fenda de tração de área unitária. A energia de fratura corresponde à área sob o ramo pós pico da curva tensão-deslocamento, como apresentado na Figura 5.14. Esta energia é um parâmetro considerado na simulação (J. Sena-Cruz 2013).

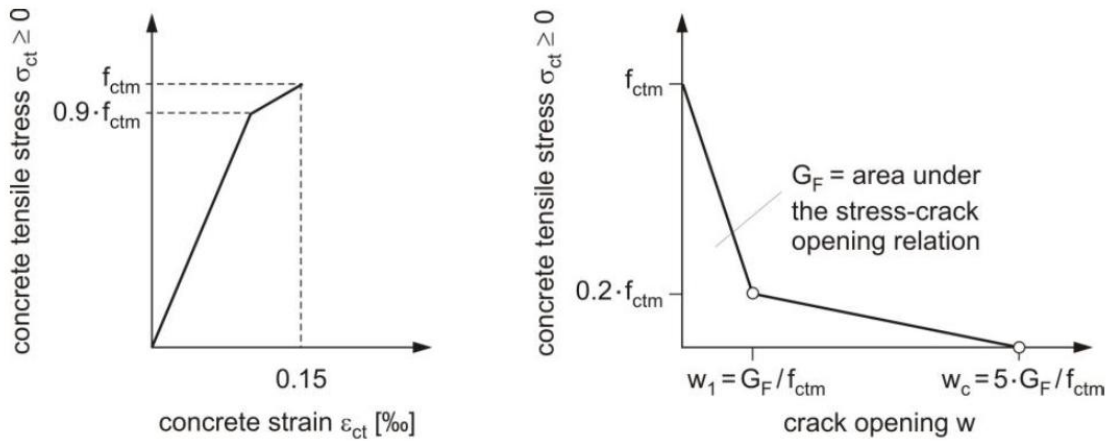


Figura 5.14: Proposta do CEB-FIP (2010) para simular a tração uniaxial do betão usando um diagrama multi-linear (J. Sena-Cruz 2013).

O CEB-FIP (1993), propõe a Equação 5.9, para a estimação da energia de fratura, na ausência de dados experimentais:

$$G_f = 0.2G_{f0}f_{cm}^{0.7} \quad (5.10)$$

onde,

$G_{f0}$  – valor base da energia de fratura e depende da máxima dimensão do agregado,  $d_{max}$ ;

O modelo NLMM203 é um diagrama multi-linear (Figura 5.14). Para a simulação de betão em tração, cada ponto que descreve a curva deve ser incluído no ficheiro de dados, sendo que o último ponto deve ser um ponto com tensão nula (J. Sena-Cruz 2013).

O diagrama multi-linear utilizado no modelo NLMM203 está ilustrado na Figura 5.15.

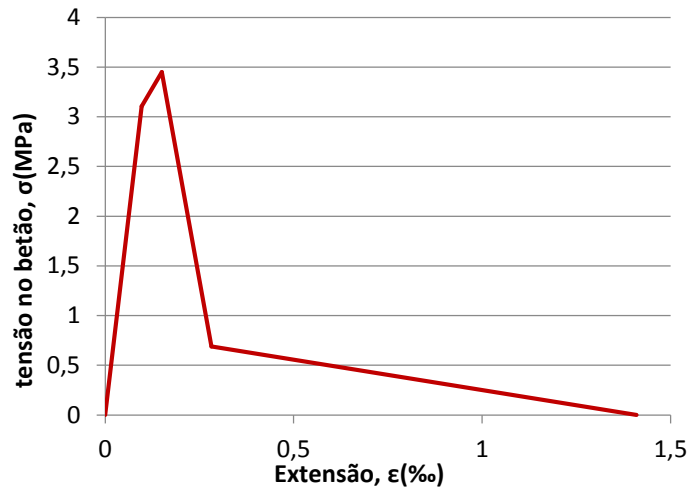


Figura 5.15: Diagrama multi-linear utilizado no modelo NLMM203

### 5.3 RESULTADOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES

Nesta secção serão apresentados todos os resultados obtidos nas simulações numéricas com recurso ao *software* SECTION.

Numa primeira fase foi definida a secção em análise com todos os elementos que a constituíam nas respetivas localizações (Figura 5.16). Na Figura 5.9 pode observar-se os diversos elementos constituintes assinalados com a diferentes cores, sendo os círculos azuis e vermelhos representativos da armadura longitudinal e do laminado CFRP, respetivamente. Seguidamente foram definidos todos os parâmetros relativos ao comportamento dos materiais presentes na laje de referência. Foram efetuadas diversas simulações, variando os valores dos parâmetros, de forma a avaliar a importância de cada parâmetro na resposta global. Uma vez que todos os materiais utilizados foram devidamente caracterizados, apenas se estimaram determinados parâmetros, tais como, a resistência máxima de tração e a energia de fratura do betão, através de formulações estimadas no EC2 e no CEB FIP Model Code 2010.

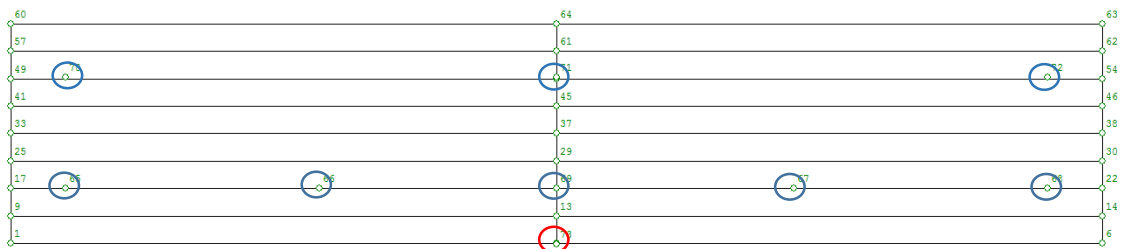


Figura 5.16: Secção transversal discretizada nos diferentes elementos finitos.

Inicialmente, foram definidos dois valores para o  $f_{ctm}$ . Os valores calculados  $f_{ctm,min}$  e  $f_{ctm,max}$  foram de 2.84 Mpa e de 5.67 MPa respetivamente. Foi também calculado o valor de  $f_{ctm}$  com base na equação 5.10 obtendo-se o valor de 3.45 MPa.

$$f_{ctm} = \frac{M_{cr}}{I_{en}} \cdot y_{g,hom} \quad (5.11)$$

onde,  $M_{cr}$  é o momento correspondente ao início de fendilhação,  $I_{en}$  é a inércia da secção ativa  $Y_{g,hom}$  é centro da gravidade da secção da laje homogeneizada.

Na Tabela 5.14 são apresentados todos os dados utilizados para as modelações.

Tabela 5.14: Valores dos parâmetros utilizados nas simulações numéricas

Materiais	Parâmetros	Valor
Betão	$f_{ctm}$	2.84 ou 3.45MPa
	$f_{cm}$	53.4 MPa
	$E_c$	32.4 GPa
	$G_{f,dmax=16 mm}$	0.09715
Aço	$E_s$	200 GPa
CFRP	$E_{CFRP}$	160 GPa

O estudo comparativo fez-se inicialmente para a laje de referência de 2.6 metros. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 5.17 e comparados com o comportamento experimental da laje REF na Tabela 5.15.

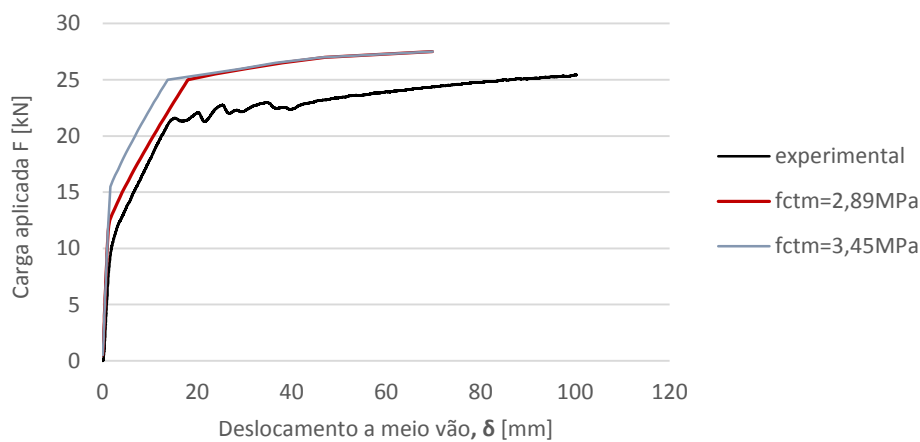


Figura 5.17: Resultados experimentais versus simulações numéricas para a laje STR em função do  $f_{ctm}$ .

Tabela 5.15: Comparação dos valores de tensão entre as simulações com diferentes valores resistência à tração

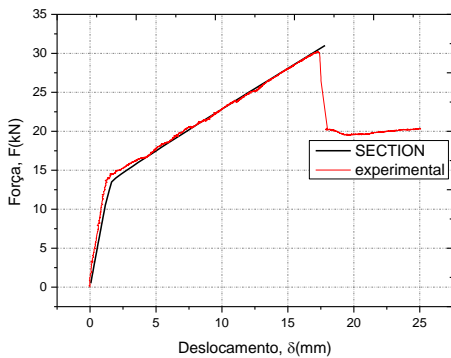
Exp. vs simulação	$F_{cr}$ (kN)	$F_y$ (kN)	F max (kN)
Experimental	11.04	21.5	25.4
$F_{ctm}=2.89$ MPa	13 (18%)	24.5 (14%)	27.5 (8.3%)
$F_{ctm}=3.45$ MPa	16 (45%)	24.5 (14%)	27.5 (8.3%)

Notas: Os valores entre parenteses correspondem à variação dos resultados do *software* SECTION quando comparados com os experimentais.

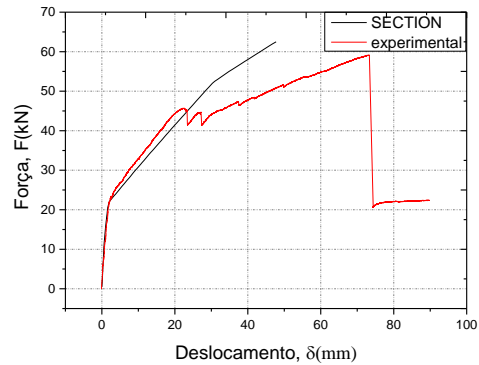
Conclui-se que, a simulação que mais se aproxima da resposta experimental foi a simulação definida para uma resistência máxima à tração igual a 2.89 MPa. O gráfico também se conclui o facto de a variação de  $f_{ctm}$  apenas determinar o início da fendilhação e não ter qualquer tipo de influência nos patamares correspondentes à plastificação das armaduras e de rotura.

Uma vez concluída a simulação da laje de referência com rigor aceitável, foram simuladas as lajes com igual comprimento. A comparação entre a resposta experimental e a resposta numérica é apresentada na Figura 5.18 está descrita na

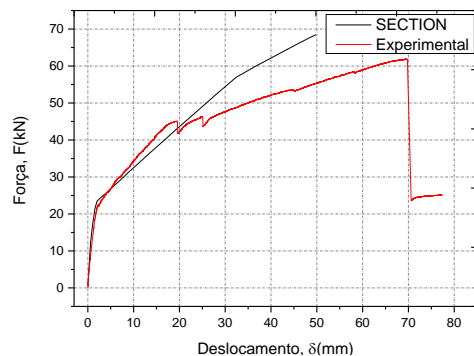
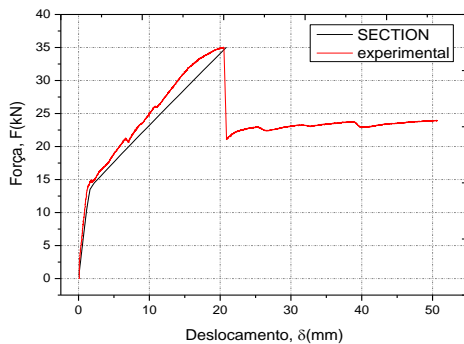
Tabela 5.16.



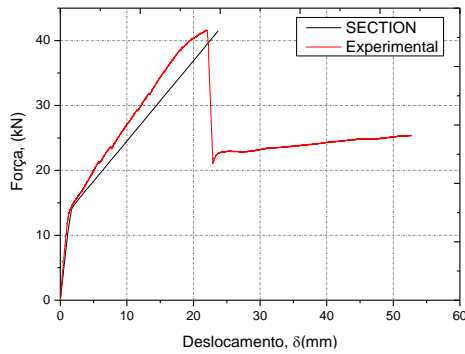
a) 50x1.2 EBR



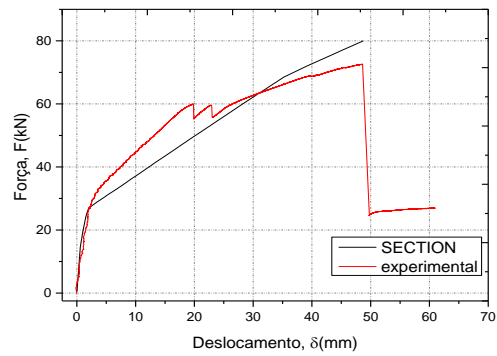
b) 50x1.2 com pré-esforço



c) 50x1.4 EBR



d) 50x1.4 com pré-esforço



e) 80x1.2 EBR

f) 80x1.2 com pré-esforço

Figura 5.18: Gráficos comparativos da simulação numérica com a resposta experimental de todas as lajes com 2.6 metros de comprimento.

Tabela 5.16: Comparação dos principais valores de tensão observados entre os dados experimentais e os dados simulados

Exp. vs simulação	$F_{cr}$ (kN)	$F_y$ (kN)	F max (kN)
50x1.2 EBR	13.5	-	30.2
Simulação	13 (3.8%)	-	30.5 (1%)
50x1.4 EBR	14.7	33.3	35
Simulação	13.5 (8.3%)	33 (1%)	34.5 (1.4%)
80x1.2 EBR	14.1	37.7	41.5
Simulação	14.5 (2.8%)	37.5 (0.5%)	40 (3.6%)
50x1.2 P.E.	27.7	69	75.3
Simulação	27 (2.5%)	68 (1.5%)	80 (6.2%)
50x1.4 P.E.	22.5	58.4	61.8
Simulação	23 (2.2%)	56.5 (3.4%)	64 (3.6%)
80x1.2 P.E.	26.5	68.7	72.5
Simulação	26 (1.9%)	69.5 (1.2%)	81.5 (12.4%)

Notas: Os valores entre parenteses correspondem à variação dos resultados do software SECTION quando comparados com os experimentais. Os valores não referenciados deveu-se ao facto de ser de difícil identificação

De acordo com os dados acima apresentados podemos concluir que:

- Os resultados das simulações realizadas para as lajes reforçadas revelaram-se mais aproximadas dos valores resultantes da resposta experimental. Apenas na laje 80x1.2 P.E. se verificou uma diferença na força de rotura superior;



- Os valores de  $F_{max}$  calculados para as lajes EBR nas simulações foi limitado para os valores da extensão máxima da resposta experimental. Isto deveu-se ao facto de todos os modos de rotura observados, experimentalmente ocorrerem devido ao descolamento do laminado, fenómeno que não é contemplado no SECTION. Observa-se assim valores simulados muito próximos dos experimentais o que revela concordância entre o modelo numérico e o modelo experimental.

### 5.3 CONCLUSÕES

Neste capítulo foram simuladas, numericamente, todas as lajes com comprimento igual a 2600 metros. Procedeu-se à modelação dos diferentes materiais através dos valores obtidos nas respetivas caracterizações presentes no capítulo 3. Procedeu-se às diferentes simulações sendo, posteriormente, comparadas com as lajes experimentais. A análise comparativa entre todos os gráficos permitiu concluir que o programa SECTION apresenta um elevado nível de previsão com um erro associado reduzido. Verificou-se ainda que, o facto de o programa considerar as interfaces entre os diferentes materiais como perfeitamente rígidas, não permitia a previsão do descolamento prematuro observado em todas as lajes reforçadas ensaiadas experimentalmente.

## CAPÍTULO 6

---

### CONTROLO DE QUALIDADE DOS SISTEMAS DE REFORÇO

#### 6.1 INTRODUÇÃO

Um dos componentes cruciais do reforço à flexão com a aplicação de laminados CFRP é a ligação do compósito à superfície da estrutura. Esta *interface*, normalmente conseguida com a utilização de colas epoxídicas, tem um papel fundamental no desempenho de todo o reforço quer em condições de serviço, quer ao nível da capacidade máxima do sistema (Colombi, Fava & Poggi, 2010; Oliveira, Basilio & Lourenço, 2011). Portanto, é de extrema importância a monitorização da qualidade da ligação após a sua aplicação, de modo a garantir que o adesivo foi colocado de forma correta e que a ligação apresenta as melhores propriedades. Outro fator importante é a inspeção do reforço ao longo do tempo de serviço, garantindo-se que este não é afetado por degradações de diversa índole (Ghiassi et al. 2014).

Por vezes a investigação da qualidade da ligação do reforço requer a realização de testes parcialmente destrutivos, como é o caso de ensaios *pull-off* (Colombi, Fava, and Poggi 2010; Oliveira, Basilio, and Lourenço 2011). No entanto, estes testes têm desvantagens associadas. O facto de serem testes muito localizados, de provocarem danos ao material de reforço e não permitem investigações muito extensas, no que respeita à localização dos possíveis defeitos ao longo do desenvolvimento do laminado, faz com que estes métodos não beneficiem de muita popularidade no âmbito da monitorização da qualidade destas aplicações. Deste modo, é necessário desenvolver métodos que permitam obter as mesmas informações sobre o estado da ligação do reforço, sem a componente destrutiva (Lai, Kou, Poon, Tsang & Lai, 2010).

O método de termografia por infravermelhos é um método não destrutivo que permite a localização e a classificação de defeitos na interface FRP/substrato betão. A aplicação deste método tem aumentado nos últimos anos, sendo obtidos bons resultados na deteção e quantificação de defeitos artificiais e, até mesmo na localização de desenvolvimento de delaminações, durante testes mecânicos em lajes de betão armado reforçadas com FRP's (Ghiassi et al. 2014). O presente capítulo foca o estudo da ligação na idade inicial de 18 lajes inseridas no projeto de investigação FRPreDUR (Ibarra-Castanedo, González, Klein, Pilla, Maldague & Vallerand, 2004).

## 6.2 MÉTODO TERMOGRÁFICO POR INFRAVERMELHOS

Nesta secção é apresentado um método de avaliação da qualidade da ligação através de um método não destrutivo, conseguido através de registos térmicos por infravermelhos. Este método permite definir o perímetro dos defeitos e estimar, quantitativamente, o tamanho de defeitos e delaminações encontradas na interface de laminados CFRP/betão quando colados de acordo com a técnica EBR. Estes defeitos, difíceis de detetar por inspeção visual, podem reduzir, significativamente, a área de contacto, e conseqüentemente, a resistência da ligação, afetando a durabilidade do tempo de serviço do sistema de reforço (W L Lai et al. 2010).

Métodos convencionais de avaliação da qualidade da ligação tais como, ensaios *pull-off* usados para determinar a resistência superficial do betão à tracção e a aderência de ligação entre materiais, através do arrancamento de um disco metálico colado ao betão (sendo a força de arrancamento relacionada com as resistências à tracção e à compressão do betão) são ensaios semi-destrutivos e são apontados como ensaios muito localizados, não sendo eficazes de realizar inspeções de larga escala (W L Lai et al. 2010).

A técnica de termografia por infravermelhos tem sido amplamente aceite como uma excelente forma de identificar e quantificar superfícies de defeito ao longo de superfícies extensas e em diversos materiais como, o alumínio, laminados de GFRP, laminados CFRP aplicados externamente em superfícies de betão, e mesmo na deteção de vazios em betão até 10 cm de espessura (Ghiassi et al. 2014). Nestas diferentes aplicações, os defeitos internos não são perceptíveis visualmente mas podem ser detetados de uma forma não destrutiva, remota e eficiente, através desta técnica, uma vez que a presença de um defeito num material compósito homogéneo reduz a taxa de difusão de calor após o aquecimento da respetiva superfície (W L Lai et al. 2010).

Existem dois métodos termográficos. Um deles é o método termográfico por infravermelhos ativo (AIT), que se caracteriza pela utilização de uma fonte de calor externa. Relativamente ao segundo método, denominado método termográfico por infravermelhos passivo (PIT), nenhuma fonte de calor externa é aplicada. O método ativo inicia-se com a transmissão de energia ao provete em forma de calor e a resposta da superfície do mesmo é, posteriormente, analisada para identificação, avaliação e localização possíveis defeitos ou discontinuidades do material. O método passivo, pelo contrário, monitoriza a superfície sem aplicação de nenhuma energia em forma de calor e identifica falhas e defeitos através da identificação de perfis de temperatura anormais (Ghiassi et al. 2014).

Na interpretação de resultados deve ter-se especial cuidado, uma vez que gradientes térmicos anormais podem ser produzidos por aquecimentos não uniformes ou até mesmo por efeitos refletivos, que resultam em variações térmicas nas imagens produzidas, não sendo relacionadas com defeitos na ligação podendo induzir em erro as avaliações da ligação.

As principais formas para conseguir aquecer a superfície externa pela técnica AIT são *pulse heating*, *step heating* e o *lock-in*. No método *pulse heating* uma pequena quantidade de energia térmica é fornecida à superfície, sendo captadas imagens térmicas durante o processo de arrefecimento da superfície (Maldague, Galmiche, & Ziadi, 2002; Taillade, Quiertant, Benzarti, & Aubagnac, 2011). O método *step heating* consiste na aplicação de uma menor intensidade de energia térmica, mas durante um intervalo de tempo maior, e as respetivas imagens captadas durante o processo de aquecimento. O método termográfico *lock-in* é muito similar ao *step-in*, tendo a particularidade de se aplicar calor à superfície, sinusoidalmente (Brown & Hamilton 2013; Ghiassi et al., 2014; Xavier Maldague, Largouët & Couturier, 1998).

Uma vez que as delaminações do FRP do substrato de betão são superficiais, o método mais aconselhado é o *pulse heating*, método escolhido para a realização deste estudo.

Geralmente, a adoção da técnica de termografia IR para avaliação da qualidade da ligação é baseada no facto de o fluxo de calor ser transmitido a velocidades diferentes, consoante as propriedades térmicas dos diferentes materiais. Num elemento reforçado com compósitos FRP, defeitos como delaminações na zona de interface alteram as propriedades térmicas nessa área. Portanto, se um fluxo de calor é aplicado à superfície de um elemento, o calor refletido nas regiões com defeito será diferente quando comparado com regiões perfeitamente aderidas, conduzindo ao aparecimento de pontos quentes ou frios nas imagens térmicas capturadas, dependendo do método de observação de calor (Ghiassi et al. 2014).

Estes métodos podem ser classificados como métodos de observação por reflexão e métodos de observação por transmissão.

No método de observação por reflexão (Figura 6.1a), a fonte de calor e câmara de infravermelhos são colocados no mesmo lado do provete e do calor refletido, sendo, a partir das superfícies das diferentes lajes, detetadas e capturadas imagens térmicas. Neste método, os defeitos aparecem como manchas quentes nas imagens térmicas captadas (Ghiassi et al. 2014).

Relativamente ao método de observação por transmissão, a fonte de calor e a câmara de infravermelhos podem ser colocadas em lados opostos do provete. O calor transmitido, através de toda a profundidade do provete, é medido na superfície em análise, sendo posteriormente

captadas fotografias térmicas (Figura 6.1b). Neste método, os defeitos aparecem como manchas frias nas imagens térmicas captadas. No presente estudo adotou-se o método de observação por reflexão, devido ao facto de se obter uma maior resolução, e, por ser aconselhável em análises onde a espessura do material é pequena. O método de observação por transmissão, apesar de permitir a inspeção de materiais com maior espessura “perde” informação ao longo da profundidade (Ghiassi et al. 2014).

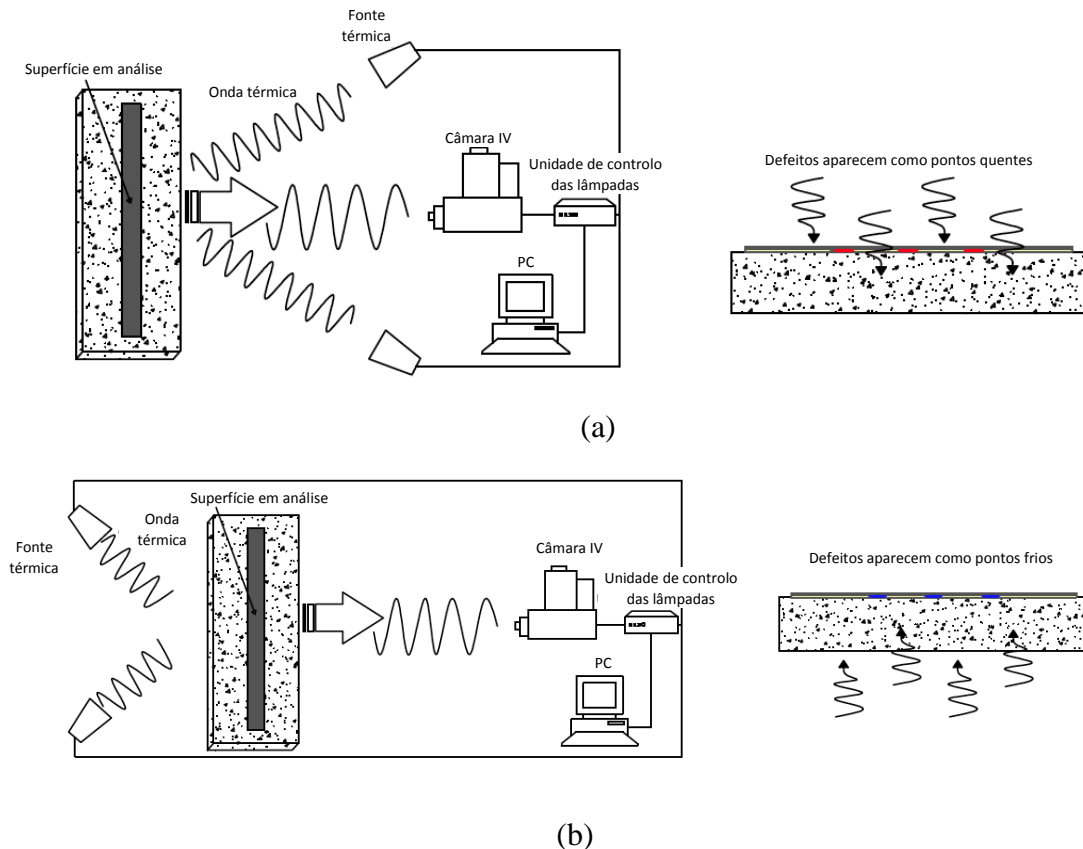


Figura 6.1: Diferentes métodos de observação das variações de temperatura através da técnica termográfica por infravermelhos ativa: **a)** método de observação por reflexão; **b)** método de observação por transmissão (Maldague, Largouët & Couturier, 1998)

### 6.2.1 ANÁLISE QUANTITATIVA POR TERMOGRAFIA DE INFRAVERMELHOS

A caracterização quantitativa dos defeitos através da informação obtida das fotografias do método de observação por reflexão pode ser conseguida através de métodos analíticos diretos ou indiretos. Os métodos analíticos diretos podem ser utilizados na caracterização do defeito, mas a sua aplicação pode ser bastante complexa, mesmo na presença de um defeito de geometria simples, resultando em situações de análise impraticáveis se for considerado as propriedades anisotrópicas do material e os defeitos no substrato (Ghiassi et al. 2014; Ibarra-Castanedo et al. 2004). Os métodos indiretos envolvem a obtenção dos parâmetros do defeito

através dos sinais termográficos. Como foi descrito anteriormente, a técnica *pulse heating* consiste na aplicação de energia em forma de calor na superfície do provete em análise durante um curto período, onde, de seguida, são obtidas as imagens térmicas durante o período de arrefecimento. Após o processo de aquecimento da superfície a temperatura reduz ao longo do tempo, sendo possível a observação da variação dos defeitos nos diferentes momentos. As imagens termográficas, geralmente, apresentam bastante “ruído”. Assim, são utilizados vários métodos de forma a melhorar as imagens obtidas e por conseguinte, a quantificação dos defeitos. As principais técnicas são: *thermal contrast*, *thermographic signal reconstruction*, *pulse phase thermography* e *principal component thermography* (Ghiassi et al. 2014).

A técnica *thermal contrast* é a técnica mais simples utilizada no processamento dos dados termográficos obtidos. Neste método o termograma mais apropriado é o que apresenta o máximo contraste entre as zonas defeituosas e as zonas sem defeito. Este método preconiza a necessidade da seleção de um termograma apropriado (maior contraste e resolução) antes da aplicação de um algoritmo analítico de forma a conseguir uma análise com o mais rigorosa possível. Esta técnica foi adotada neste estudo uma vez que se mostrou suficientemente precisa em sistemas EBR com laminados CFRP em estudos realizados por outros autores.

São conhecidos vários tipos de contrastes neste tipo de análises, tais como, o máximo contraste, o contraste diferencial e o contraste normalizado. Todos os contrastes necessitam de um termograma de uma área não defeituosa. Neste estudo, foi aplicado o contraste absoluto que assume que todos os pontos se comportam de forma igual nas primeiras imagens, apresentando a mesma intensidade térmica. Uma vez selecionado o termograma com maior contraste, a medição das diferentes áreas defeituosas pode ser estimada com algoritmos adequados.

Vários algoritmos são propostos por diferentes investigadores como *high degree approximation*, *second order fit and inflection point* (Ghiassi et al. 2014; W L Lai et al. 2010). Nesta dissertação foi escolhido o método *inflection point*, este também utilizado na deteção de falhas e defeitos em reforços com compósitos CFRP colados externamente apresentando resultados satisfatórios.

### 6.2.2 MÁXIMO CONTRASTE TÉRMICO

As imagens térmicas visualizadas numa área defeituosa ou não defeituosa, varia ao longo do tempo, devido ao facto da dissipação de calor ser dependente do tempo. Deste modo, a seleção de um termograma fixo apropriado, num determinado instante, é necessário para a

extração e definição dos limites de um local defeituoso (Benítez et al. 2008). Como indicado anteriormente, o critério de seleção é, geralmente, baseado no termograma que apresenta o maior contraste térmico, sendo este contraste definido através do diferencial de temperaturas entre a falha e uma zona não defeituosa como apresenta a Figura 6.2 (W L Lai et al., 2010; W. L. Lai, Kou, Poon, Tsang & Lee, 2013).

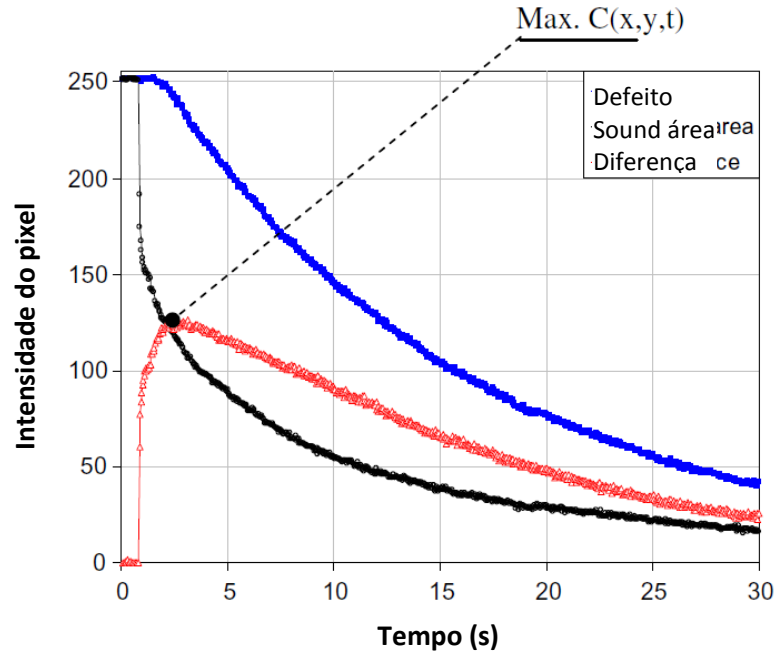


Figura 6.2: Variação de intensidade de dois *pixels*, sendo um representativo de uma zona defeituosa e o outro de uma zona sem defeito (W L Lai et al. 2010)

A Equação 6.1 combina as referências temporais e espaciais do contraste térmico obtido, onde  $C(x, y, t)$  é o contraste térmico espacial observado para um dado tempo  $t$ ;  $T_{def}(x, y, t)$  é a temperatura espacial que um defeito apresenta para um tempo  $t$ ,  $T_{def}(t_0)$  é a temperatura espacial inicial de um defeito;  $T_{sound}(t)$  é a temperatura de uma posição particular onde não se visualiza qualquer tipo de defeito qualquer que seja o instante de tempo  $t$ ;  $T_{sound}(t_0)$  é a temperatura de uma posição particular onde não se visualiza qualquer tipo de defeito num momento inicial  $t_0$ ;  $T_{def}(t_0) = T_{sound}(t_0)$  se for assumido que a zona defeituosa e a não defeituosa atingem a mesma temperatura no momento inicial (Lai et al., 2010).

$$C(x, y, t) = \frac{\Delta T_{def}(x, y, t)}{\Delta T_{sound}(x, y, t)} = \frac{T_{def}(x, y, t) - T_{def}(t_0)}{T_{sound}(t) - T_{sound}(t_0)} \quad (6.12)$$

### 6.2.3. ALGORITMO DE DOIS PONTOS DE INFLEXÃO NA DEFINIÇÃO DOS LIMITES DO DEFEITO

Após a extração do termograma apropriado relativo ao máximo contraste  $\text{Max } C(x,y,t)$  como indicado na Figura 6.2, o termograma foi analisado, sendo a forma geométrica do defeito estimada através da forma aparente deduzida pelo perfil de pixéis apresentada na Figura 6.3.

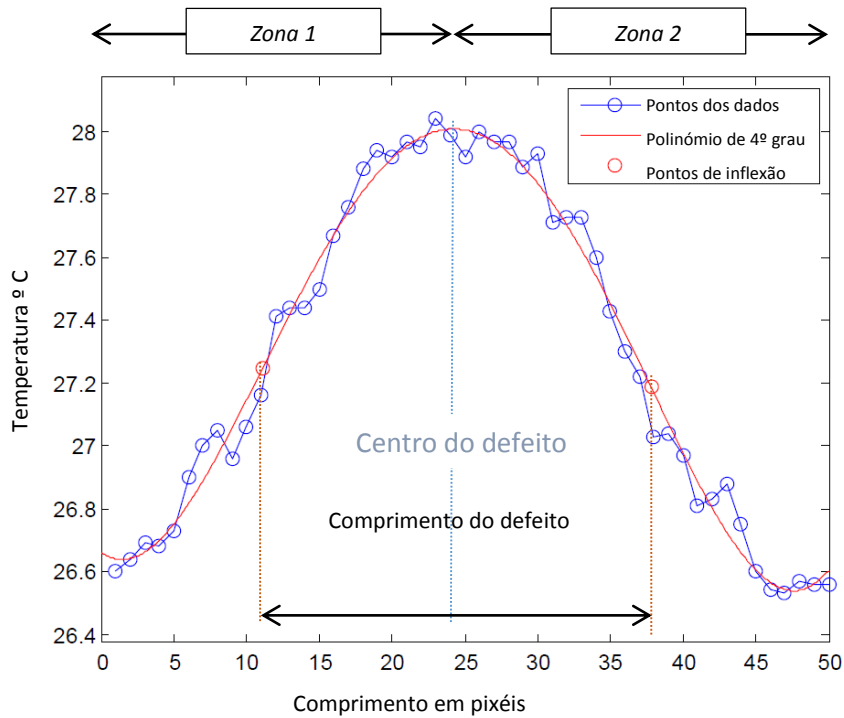


Figura 6.3: Variação de intensidade de um *pixel* ao longo do comprimento de um respetivo defeito

Nesta dissertação, o algoritmo *inflection point* foi adotado. O perfil térmico pode ser dividido em duas partes no ponto central. Através da aplicação de um polinómio de 4º grau,  $P(x)$ , podemos ajustar a curva como é apresentado na Figura 6.3. De forma a obter os pontos de inflexão,  $P(x)$  foi derivado duas vezes, obtendo-se uma equação de 2º grau que, quando igualada a zero, nos dá os respetivos pontos de inflexão, como apresentado na equação 6.2, onde  $x$  representa a célula do *pixel* em análise. O ponto de inflexão é a célula do *pixel* onde se verifica o limite do defeito; e  $P(x)$  o polinómio ajustado, representa a intensidade do *pixel* (Lai et al., 2010).

$$\frac{\partial^2 P(x)}{\partial x^2} = 0 \tag{6.13}$$



O número de *pixéis* entre pontos de inflexão foi contado, representando assim o comprimento aparente do defeito.

### 6.3 VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA

A precisão do método de análise não destrutiva de elementos de BA reforçados com laminados CFRP através da técnica EBR, foi avaliada. Para tal, provetes de betão reforçados com laminados CFRP com defeitos incorporados de tamanhos variados foram preparados e testados com o método termográfico por infravermelhos.

#### 6.3.1 PREPARAÇÃO DOS PROVETES

Provetes de betão com dimensões de  $150 \times 150 \times 300 \text{ mm}^3$ , foram utilizados para reproduzir a resposta térmica das lajes analisadas, sendo o seu analisado o seu comportamento. Estes foram reforçados com laminados pré-fabricados de CFRP com as mesmas características do reforço aplicado nas lajes, com uma espessura de 1.2mm e uma largura de 100 mm. Utilizou-se o mesmo adesivo que foi utilizado no reforço das lajes estudadas, estando as suas características apresentadas no capítulo 3. A aplicação do adesivo foi cuidada de forma a obter-se uma espessura contínua de 2mm ao longo da largura e comprimento do laminado. Para tal foi produzida uma caixa onde a quantidade de epóxi aplicado era controlado por uma abertura triangular ajustável que permitia aplicar uniformemente a quantidade de adesivo desejado. A Figura 6.4 apresenta os passos realizados na preparação dos provetes.



a)



b)



c)



d)

Figura 6.4: preparação dos provetes para validação dos resultados obtidos. a) Aplicação dos defeitos artificiais na superfície do Betão e Laminado; b) Preparação do epóxi; c) aplicação do epóxi às superfícies a aderir; d) Colocação do laminado na superfície do betão.

### 6.3.2 PROCEDIMENTO

A validação dos dados obtidos da análise termográfica das lajes, foi realizada através de dois provetes. Num provete foram aplicados os defeitos artificiais na interface entre o laminado e o adesivo. No segundo provete, os defeitos artificiais foram aplicados no interface entre o betão e o adesivo. Os defeitos artificiais foram conseguidos através da colagem de círculos de plástico com diâmetros de 12.5 mm, 25 mm, 35 mm, e 50 mm como apresentado na Figura 6.4a.

Após a aplicação dos defeitos, procedeu-se a preparação e aplicação cuidadosa do adesivo às superfícies dos materiais a aderir ilustrado na Figura 6.4c. Os provetes foram acomodados, durante um período de cura de cerca de um mês no laboratório anteriormente à realização dos ensaios termográficos.

Os testes foram realizados com uma câmara de infravermelhos FLIR ThermoCAM T400 com um alcance espectral de 7.5-13  $\mu\text{m}$  e uma sensibilidade térmica de  $<0.07$   $^{\circ}\text{C}$ . Foram gravados vídeos térmicos com 9 *frames* por segundo durante a fase de arrefecimento das lajes reforçadas, sendo posteriormente convertidos em fotografias digitais de 8 bits com um tamanho de 320x240 pixels. Nos sistemas de 8-bits cada *pixel* tem um valor de intensidade de 0 a 255, representando as diferentes cores e variações térmicas numa escala linear. Os dados resultantes da análise de intensidade dos *pixels* de cada teste foram convertidos numa matriz de 3 dimensões (320x240xt) sendo a terceira dimensão a variação temporal dos vídeos. A diminuição da temperatura ao longo do tempo foi analisada através de um algoritmo em Matlab, pelo Dr. Bahman Giassi.

Como fonte térmica, foi utilizada uma pistola de ar quente, a uma distância de cerca de 0.5m do laminado, durante um espaço de tempo entre 1 a 1.5 minutos como apresentado na Figura 6.5. De modo a conseguir uma melhor distribuição térmica, ajustaram-se a posição e o tempo de incidência, com base no registo térmico obtido.



Figura 6.5: Aplicação de energia térmica ao provete.

De forma a diminuir a perturbação dos reflexos originados pela incidência da luz natural nos provetes, os vídeos foram gravados numa caixa envolvente (Figura 6.6).



Figura 6.6: Processo de obtenção dos vídeos térmicos dentro de uma caixa envolvente.

### 6.3.2 RESULTADOS DA VALIDAÇÃO

As curvas da temperatura ao longo do tempo dos diferentes defeitos artificiais são apresentados na Figura 6.7a. Estas curvas foram obtidas através da análise da temperatura verificada no *pixel* central de cada defeito (Figura 6.7b).

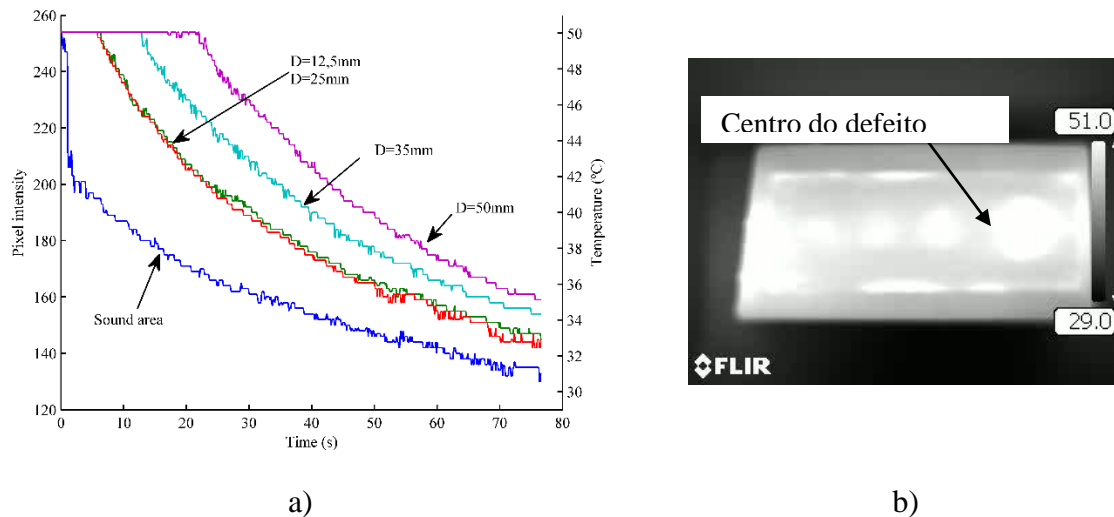


Figura 6.7: Análise da temperatura ao longo do tempo; a) Variação ao longo do tempo dos diferentes defeitos e área não defeituosa; b) zona de análise do defeito de diâmetro de 50 mm

Analisando o gráfico do comportamento térmico do provete (Figura 6.7a) conclui-se que todas as zonas defeituosas apresentam um decrescimento de temperatura muito diferente da zona não defeituosa escolhida. Assim, pode afirma-se que defeitos com um diâmetro superior ou igual a 12.5mm podem ser facilmente detetados por esta técnica.

Verifica-se também um comportamento muito semelhante entre os defeitos 12.5 mm e 25 mm, pelo que o máximo contraste entre o *sound area* e estes dois defeitos foi obtido conjuntamente.

O contraste máximo foi determinado para todos os defeitos, sendo apresentados os resultados na Tabela 6.17 os instantes de tempo para os quais se obteve os valores de contraste máximo. Ressalta-se que o limite superior ficou um pouco abaixo do desejado resultando na obtenção da resposta térmica inicial constante das zonas defeituosas.

Tabela 6.17: Identificação dos contrastes máximos e correspondentes instantes de tempo

Diâmetro	Tempo (s)	C. max
D1- 12,5 mm	6.5	61
D2- 25 mm	7.5	59
D3- 35 mm	13	74
D4- 50 mm	21	85

Os termogramas correspondentes ao Contraste máximo (C.max) foram selecionados para avaliar as suas dimensões, sendo as dimensões calculadas através do método *inflection*

*point*. Os cálculos foram efetuados longitudinal e transversalmente em todos os defeitos, de forma a obter o diâmetro em ambas as direções, ver Tabela 6.18.

Tabela 6.18: Diâmetros obtidos para cada defeito

Defeito real (mm)	Defeito visualizado pela técnica termográfica		
	D. horizontal (mm)	D. vertical (mm)	Área vis./Área real
12.5	14.7	12.6	1.18
25	27.2	26.1	1.14
35	36.4	39.7	1.18
50	51.1	50.8	1.04

A área de defeito observada foi calculada admitindo que esta apresentava uma forma elíptica. Seguidamente, procedeu-se à comparação entre as áreas defeituosas e as áreas reais dos defeitos aplicados. Todos os defeitos foram visualizados com uma precisão elevada, tendo apresentado um erro associado inferior a 20%.

Os resultados validam a fidelidade e precisão desta técnica utilizada, na deteção de defeitos no interface entre o laminado e a superfície de betão. Observações similares foram apresentadas em Lai et al. (2010) e Taillade et al. (2011) na deteção de defeitos em elementos de BA reforçados com CFRP.

#### 6.4 ANÁLISE TERMOGRÁFICA EM LAJES REFORÇADAS COM LAMINADOS PRÉ-ESFORÇADOS CFRP

Uma vez validado o método termográfico escolhido, procedeu-se à análise de um conjunto de lajes pertencentes ao programa experimental inserido no projeto de investigação FRPreDUR. Foram analisadas 18 das lajes, das quais 14 foram reforçadas pelo método gradiente de esforços (GA) e as outras 4 reforçadas pelo método mecânico (MA). As lajes GA envolveram uma análise mais cuidadosa uma vez que a qualidade da ligação é fulcral no desempenho mecânico de todo o sistema. As extremidades da ligação nos sistemas MA não foram analisadas, devido ao facto de as chapas metálicas impossibilitarem a deteção de zonas defeituosas (Figura 6.8).

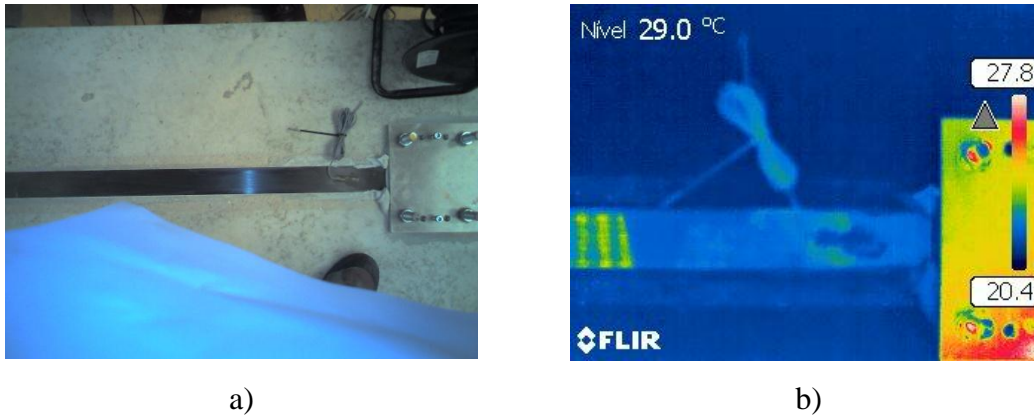


Figura 6.8: a) Fotografia digital do local da imagem termográfica; b) Imagem termográfica

A análise térmica foi realizada antes de as lajes serem submetidas a um processo de envelhecimento acelerado previsto no projeto (humidade, gelo/degelo, ciclos térmicos, entre outras), de forma a servir de referência a ensaios termográficos futuros, posteriores ao processo de envelhecimento.

Foram obtidas imagens térmicas, ao longo de toda a extensão do laminado, bem como fotografias digitais fulcrais na análise crítica das fotografias térmicas (identificação das zonas de reflexo e das zonas com imperfeições, como por exemplo, resíduos de epóxi sobrepostos ao laminado), que determinaram as conclusões face às variações térmicas observadas.

Após o levantamento das imagens térmicas de toda a extensão da ligação do reforço de cada laje, foram selecionados possíveis defeitos através da análise das fotografias térmicas. A deteção destes defeitos não se realizou sobre o termograma de maior contraste, (tendo-se obtido imagens termográficas com contraste aceitável ao longo do laminado) e resumiu à análise de uma fotografia digital e do termograma do local em análise. Foram efetuadas duas leituras em cada um dos defeitos aparentes detetados e selecionados (uma vertical e uma outra horizontal), de forma a calcular a área aparente visualizada (Figura 6.9).

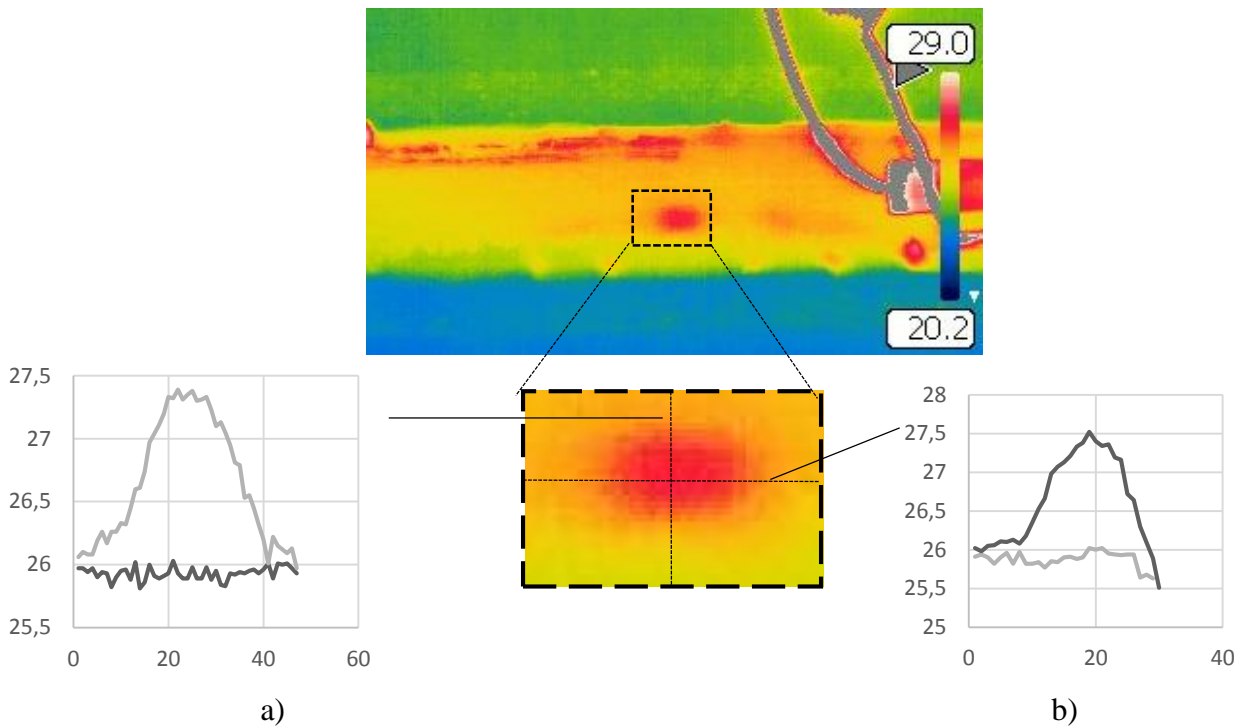


Figura 6.9: Variação térmica ao longo de diferentes perfis; a) perfil vertical; b) perfil horizontal

Todos os defeitos localizados estão devidamente identificados e calculados (área aparente) na Tabela 6.19: Área aparente e localização dos defeitos detetados.. A localização das não-uniformidades nas lajes GA foi agrupada em 5 zonas diferenciadas (A1, A2, A3, M, B1, B2, B3) como se consegue ver na Figura 6.10.

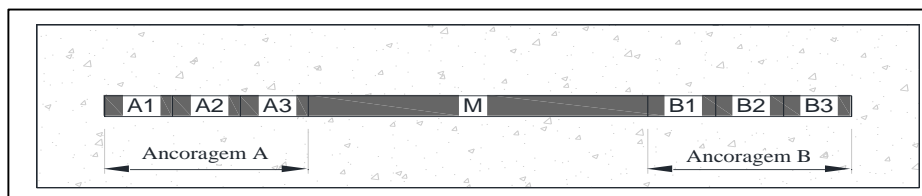


Figura 6.10: Zonas de identificação da localização dos potenciais defeito

Todos os defeitos apontados foram observados nas lajes reforçadas através do método de gradiente de esforços. Os valores apresentados são especulativos uma vez que foi impossível a comprovação dos mesmos. Uma vez que são defeitos muito pequenos o percentagem de erro associada é considerável.

Tabela 6.19: Área aparente e localização dos defeitos detetados.

Laje	Defeitos	D. horizontal (mm)	D. vertical (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Local
17	1	11.3	9.12	3.23	M
	2	1.4	10.8	5.23	A1
21	1	13.2	5.5	2.3	M
25	1	7.7	5.5	1.3	B3
27	1	12.24	11.5	4.5	M
31	1	29.7	8.6	8.1	B3



## 6.5 CONCLUSÃO

Este programa experimental foi realizado com o intuito de se avaliar o interface laminado CFRP/substrato betão em lajes de BA reforçadas com compósitos. Através da experiência ganha durante o processo de validação deste método e dos resultados obtidos, são apresentadas as seguintes conclusões sobre o método termográfico utilizado: (i) o método termográfico por infravermelhos, revela-se um método simples e de fácil aplicação na deteção de irregularidades; (ii) é um método com uma percentagem de erro baixa, mas são vários os fatores que têm de ser considerados na análise (reflexão da superfície, sujidade superficial, diferentes comportamentos térmicos dos diferentes materiais, entre outros) e para isso, necessita de um profissional experiente e dotado de uma certa sensibilidade para que, através da análise das variações térmicas e da respetiva superfície, seja capaz de diferenciar as zonas defeituosas e as zonas sem defeito.

Apesar de não ter sido devidamente aplicado, o método termográfico possibilitou a localização de defeitos na interface de elementos de BA reforçados com Laminados CFRP, com um erro associado máximo de 18%.

Os valores obtidos revelam uma adequada aplicabilidade da técnica termográfica na avaliação da durabilidade destes sistemas. O facto de ser um método simples e prático faz com que seja adequado a monitorizações *in situ*.

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSÕES FINAIS E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

#### 7.1 CONCLUSÕES FINAIS

A presente dissertação teve como principal objetivo aumentar o conhecimento do comportamento de estruturas de betão armado reforçadas com compósitos CFRP pré-esforçados, através do estudo de dois sistemas de ancoragem que permitem a aplicação de pré-esforço aos laminados de CFRP: (i) sistema GA; e (ii) sistema MA.

De forma a ser possível estudar a influência do reforço através de compósitos CFRP em lajes de betão armado, foram produzidas 12 lajes. O conjunto de lajes ensaiadas são divididas conforme apresentado na Figura 7.1.

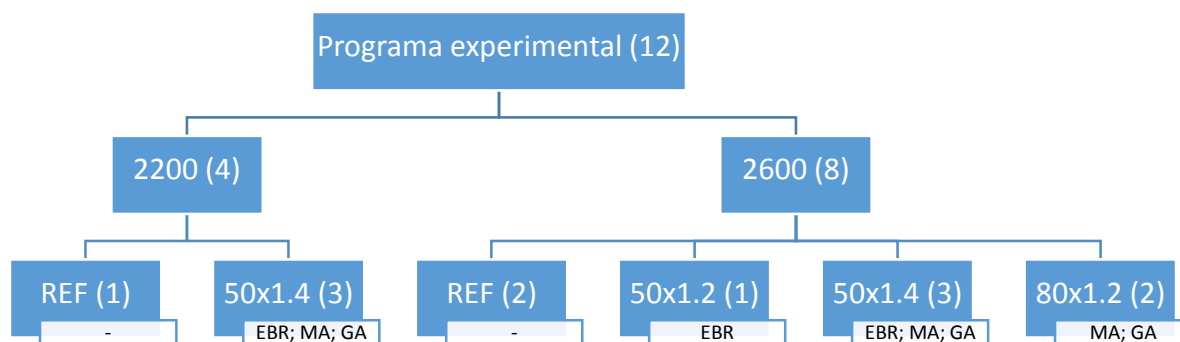


Figura 7.11: Programa de ensaios da presente dissertação. Entre parêntesis é apresentado o número de lajes ensaiadas de acordo com o comprimento e a técnica de reforço aplicada.

De forma a serem obtidos valores fidedignos, todas as lajes foram devidamente reforçadas e preparadas para serem submetidas aos ensaios de flexão. Particular ênfase foi dado às lajes reforçadas com laminados CFRP pré-esforçados através da técnica GA seguiram um processo de monitorização cuidadoso durante o tempo de cura acelerada do adesivo nas zonas de ancoragem, controlando criteriosamente a temperatura e a força aplicada nos macacos hidráulicos.

No presente estudo, todas as lajes de betão armado foram ensaiadas à flexão até à rotura. Os valores obtidos nos ensaios permitiram as seguintes conclusões: (i) as lajes reforçadas apresentaram um incremento de rigidez quando comparada com as lajes sem reforço (exceto na fase linear elástica). (ii) as lajes reforçadas com presença de pré-esforço mostram um aumento

de capacidade de carga comparativamente com as lajes de reforçadas passivamente (EBR); (iv) as lajes reforçadas com laminados pré-esforçados através dos dois sistemas estudados apresentam um comportamento muito semelhante até a uma certa carga que causa o descolamento do laminado. No entanto, as lajes com ancoragens por gradiente colapsam quando se atinge a carga relativa ao descolamento do laminado. Nas lajes reforçadas com o sistema MA as ancoragens metálicas não permitem que o laminado escorregue, o que resulta numa carga de colapso superior. (v) o mesmo modo de rotura foi observado em todas as lajes sendo o colapso resultado do descolamento prévio do laminado; (vi) a performance do sistema de reforço é influenciado pela largura do laminado, mas não pela espessura do mesmo; (vii) as lajes reforçadas apresentam uma evolução de fendas bastante inferior à das lajes de referência; (viii) foi efetuado uma análise do espaçamento entre fendas de todas as lajes, onde se concluiu que nas lajes com laminados pré-esforçados o espaçamento era consideravelmente menor quando comparado com as lajes EBR e as lajes de referência.

De forma a contribuir para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de ferramentas numéricas, foi complementado ao estudo experimental um estudo numérico das lajes com o comprimento igual a 2600 metros. Assim, estas lajes foram simuladas através do programa denominado SECTION, com recurso a modelos constitutivos adequados à simulação dos materiais envolvidos. Os materiais foram simulados tendo em conta os valores obtidos no capítulo da caracterização do material (Capítulo 3). Realizaram-se as diferentes simulações tendo em conta os valores referidos anteriormente, sendo posteriormente comparadas com as lajes experimentais. Através da realização de gráficos com a informação experimental e numérica foi possível comparar o comportamento de ambas levando à conclusão que o programa SECTION permite simular este tipo de estruturas com rigor suficiente. Verificou-se ainda que o facto de o programa apresentar algumas limitações nomeadamente, considerar aderência perfeita entre os materiais, não permitindo, por isso, prever o descolamento precoce observado em todas as lajes reforçadas ensaiadas experimentalmente.

De forma a conseguir apresentar um método não destrutivo para a análise da interface CFRP/betão foi realizada uma análise termográfica num conjunto de lajes de betão armado reforçadas com laminados. A validação do método foi conseguida através da análise de provetes reforçados com defeitos embutidos na interface CFRP/betão. De acordo com a experiência obtida no processo conclui-se que: (i) o método termográfico revelou-se simples e de fácil aplicação na deteção de imperfeições; (ii) vários os fatores têm de ser considerados na análise (reflexão da superfície, sujidade superficial, diferentes comportamentos térmicos dos diferentes

materiais, entre outros) sendo que para isso, é necessário um profissional experiente para que, através da análise das variações térmicas e da respetiva superfície, consiga diferenciar as zonas que não padecem de defeito e as zonas defeituosas. Assim, sendo um método acessível e expedito, é adequado a monitorizações *in situ*. As lajes analisadas apresentaram poucas zonas de defeito sugerindo a correcta aplicação do reforço.

## 7.2 FUTURO DESENVOLVIMENTOS

Após a realização do presente estudo, foram identificados vários temas que podem ser objeto de futuros estudos e desenvolvimentos. Assim, enumeram-se vários tópicos como trabalhos futuros:

- Verificação das restantes condicionantes em serviço, nomeadamente a limitação de tensões no betão e nas armaduras e controlo de deformação;
- Análise de lajes reforçadas com laminados CFRP previamente fissuradas ou danificadas;
- Análise do comportamento das lajes reforçadas com laminados CFRP pré-esforçados quando submetidas a diferentes exposições ambientais;
- Análise da influência dos laminados CFRP pré-esforçados considerando os efeitos diferidos no betão, nomeadamente, a retração e a fluência;
- Análise do comportamento dos laminados CFRP pré-esforçados presentes em lajes reforçadas quando submetidos a ações cíclicas.



## REFERÊNCIAS

---

- Aiello, M. A., & Leone, M. (2008). Interface analysis between FRP EBR system and concrete. *Composites Part B: Engineering*, (39), 618–626. doi:10.1016/j.compositesb.2007.07.002
- Al-Mahaidi, R., & Kalfat, R. (2011). Investigation into CFRP plate end anchorage utilising uni-directional fabric wrap. *Composite Structures*, 93(2), 821–830. doi:10.1016/j.compstruct.2010.07.012
- Almeida, J. (2013). *Comportamento estrutural a longo prazo e de durabilidade de elementos de betão reforçados de acordo com a técnica NSM*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade do Minho.
- Alvim, R. (2012). Concreto Armado - A estrutura interna do material. Blog oficial de Engenharia Civil Universidade estadual de Santa Cruz. Acedido em 15 de julho de 2015, em <http://engenhariacivildaescc.blogspot.pt/2012/05/concreto-armado-estrutura-interna-do.html>
- Bakis, C. E., Bank, L. C., Asce, F., Brown, V. L., Asce, M., Cosenza, E. & Triantafillou, T. C. (2002). Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction — State-of-the-Art Review, (May), 73–87.
- Balaguru, P., Balaguru, P., Nanni, A., Nanni, A., Giancaspro, J., & Giancaspro, J. (2008). *FRP Composites for Reinforced and Prestressed Concrete Structures: A Guide to Fundamentals and Design for Repair and Retrofit* (p. 336).
- Barros, J. (2004). Materiais compósitos no reforço de estruturas. *Universidade Do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Portugal*.
- Barros, J., & Fortes, A. S. (2005). Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits. *Cement and Concrete Composites*, 27, 471–480. doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.07.004
- Benítez, H. D., Ibarra-Castanedo, C., Bendada, A., Maldague, X., Loaiza, H., & Caicedo, E. (2008). Definition of a new thermal contrast and pulse correction for defect quantification in pulsed thermography. *Infrared Physics and Technology*, 51, 160–167. doi:10.1016/j.infrared.2007.01.001

- Brown, J. R., & Hamilton, H. R. (2013). Quantitative infrared thermography inspection for FRP applied to concrete using single pixel analysis. *Construction and Building Materials*, 38, 1292–1302. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.12.016
- Carvalho, T. S. De. (2010). *Reforço à flexão de vigas de betão armado com compósitos de CFRP*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil Estruturas e Geotecnia Pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
- Coelho, M., Fernandes, P., Sena-Cruz, J. M., & Barros, J. (2011). *Comportamento da ligação entre laminados multi-direcionais de CFRP e o betão* (p. 74).
- Coelho, M., Silva, L., Sena-Cruz, J., & Barros, J. (2011). Estudo comparativo de diferentes técnicas no reforço à flexão de vigas de betão armado com recurso a CFRP's sob ações monotónicas e de fadiga. *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas*, 1–18.
- Colombi, P., Fava, G., & Poggi, C. (2010). Bond strength of CFRP-concrete elements under freeze-thaw cycles. *Composite Structures*, 92(4), 973–983. doi:10.1016/j.compstruct.2009.09.044
- Czaderski, C., Martinelli, E., Michels, J., & Motavalli, M. (2012). Effect of curing conditions on strength development in an epoxy resin for structural strengthening. *Composites Part B: Engineering*, 43(2), 398–410. doi:10.1016/j.compositesb.2011.07.006
- Czaderski, C., & Motavalli, M. (2007). 40-Year-old full-scale concrete bridge girder strengthened with prestressed CFRP plates anchored using gradient method. *Composites Part B: Engineering*, 38, 878–886. doi:10.1016/j.compositesb.2006.11.003
- Diab, H., Wu, Z., & Iwashita, K. (2009). Short and long-term bond performance of prestressed FRP sheet anchorages. *Engineering Structures*, 31(5), 1241–1249. doi:10.1016/j.engstruct.2009.01.021
- Dong-suk, Y., Sun-Kyu, P., & Kenneth, W. N. (2009). Flexural Behaviour of Reinforced Concrete Beams. *Composite Structures*, 497–508.
- El-Hacha, R., & Soudki, K. (2013). Prestressed near-surface mounted fibre reinforced polymer reinforcement for concrete structures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(September), 1127–1139. doi:10.1139/cjce-2013-0063

- El-Hacha, R., Wight, R., & Green, M. (2001). Prestressed fibre-reinforced polymer laminates for strengthening structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 3, 111–121. doi:10.1002/pse.76
- fib – federation international du béton (2001) *Bulletin 14: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*, State-of-Art Report, pp. 138, ISBN 978-2-88394-054-3.
- fib – federation international du béton (2012) *Bulletin 65: Model Code 2010, Volume 1*, State-of-Art Report, pp. 350, ISBN 978-2-88394-105-2.
- Firmo, J. (2010). *Comportamento ao fogo de vigas de betão armado reforçadas à flexão com laminados de fibras de carbono ( CFRP ) Desenvolvimento de sistemas de protecção ao fogo Engenharia Civil Júri*.
- França, P., Costa, A., & Appleton, J. (2004). *Reforço de estruturas cm laminados de CFRP pré-esforçados*. In *Encontro nacional betão estrutural* (p. 8).
- Garden, H. N., Quantrill, R. J., Hollaway, L. C., Thorne, a. M., & Parke, G. a R. (1998). Experimental study of the anchorage length of carbon fibre composite plates used to strengthen reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 12, 203–219. doi:10.1016/S0950-0618(98)00002-6
- Ghafoori, E., Motavalli, M., Botsis, J., Herwig, a., & Galli, M. (2012). Fatigue strengthening of damaged metallic beams using prestressed unbonded and bonded CFRP plates. *International Journal of Fatigue*, 44, 303–315. doi:10.1016/j.ijfatigue.2012.03.006
- Ghiassi, B., Silva, S. M., Oliveira, D. V., Lourenço, P. B., & Bragança, L. (2014). FRP-to-Masonry Bond Durability Assessment with Infrared Thermography Method. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 33(3), 427–437. doi:10.1007/s10921-014-0238-8
- Granja, J. L., Fernandes, P., Benedetti, A., Azenha, M., & Sena-Cruz, J. (2015). Monitoring the early stiffness development in epoxy adhesives for structural strengthening. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 59, 77–85. doi:10.1016/j.ijadhadh.2015.02.005
- Hutchinson, a R., & Hollaway, L. C. (1999). *Strengthening of Reinforced Concrete Structures. Strengthening of Reinforced Concrete Structures* (pp. 156–182). doi:10.1533/9781855737617.156



- Ibarra-Castanedo, C., González, D., Klein, M., Pilla, M., Vallerand, S., & Maldague, X. (2004). Infrared image processing and data analysis. *Infrared Physics & Technology*, *46*, 75–83. doi:10.1016/j.infrared.2004.03.011
- ISIS (2006e), *Module 6 – Application and Handling of FRP Reinforcements for Concrete*, The Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovate Structures, ISIS Canada Corp., Department of Civil Engineering, Queen’s University, Canada, 27 p.
- ISIS. (2007). *Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers*. Design Manual no. 3. The Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovate Structures, ISIS Canada Corp., Department of Civil Engineering, Queen’s University, Canada, 151p.
- ISO. (1997). “Plastics - Determination of tensile properties - Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastics.” ISO-527-5, Geneva.
- ISO. (2012). “Plastics—Determination of tensile properties—Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics.” ISO-527-2, Geneva.
- Juvandes, L. F. P. e Costa, A. G. (2002), *Reforço e Reabilitação de Estruturas*, Módulo 2, Formação Profissional – Ordem dos Engenheiros, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Laboratório de Estruturas, Departamento de Engenharia Civil, Porto, 78 p.
- Kang, T. H.-K., Howell, J., Kim, S., & Lee, D. J. (2012). A State-of-the-Art Review on Debonding Failures of FRP Laminates Externally Adhered to Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*. doi:10.1007/s40069-012-0012-1
- Kim, Y. J., Gordon Wight, R., & Green, M. F. (2008). Flexural Strengthening of RC Beams with Prestressed CFRP Sheets: Using Nonmetallic Anchor Systems. *Journal of Composites for Construction*, *12*(February), 44–52. doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:1(44)
- Kotynia, R., Lasek, K., & Staskiewicz, M. (2014). Flexural Behavior of Preloaded RC Slabs Strengthened with Prestressed CFRP Laminates. *Journal of Composites for Construction*, 1–11. doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000421.

- Lai, W. L., Kou, S. C., Poon, C. S., Tsang, W. F., & Lai, C. C. (2010). Characterization of the deterioration of externally bonded CFRP-concrete composites using quantitative infrared thermography. *Cement and Concrete Composites*, 32(9), 740–746. doi:10.1016/j.cemconcomp.2010.03.008
- Lai, W. L., Kou, S. C., Poon, C. S., Tsang, W. F., & Lee, K. K. (2013). A durability study of externally bonded FRP-concrete beams via full-field infrared thermography (IRT) and quasi-static shear test. *Construction and Building Materials*, 40, 481–491. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.105
- Maldague, X., Galmiche, F., & Ziadi, a. (2002). Advances in pulsed phase thermography. *Infrared Physics and Technology*. doi:10.1016/S1350-4495(02)00138-X
- Maldague, X., Largouët, Y., & Couturier, J.-P. (1998). A study of defect depth using neural networks in pulsed phase thermography: modelling, noise, experiments. *Revue Générale de Thermique*. doi:10.1016/S0035-3159(98)80048-2
- Meier, U. (1995). Strengthening of structures using carbon fibre / epoxy composites. *Construction and Building Materials*, 9(6), 341–351.
- Michels, J., Martinelli, E., Czaderski, C., & Motavalli, M. (2014). Prestressed CFRP Strips with Gradient Anchorage for Structural Concrete Retrofitting: Experiments and Numerical Modeling. *Polymers*, 6, 114–131. doi:10.3390/polym6010114
- Michels, J., Sena-Cruz, J., Czaderski, C., & Motavalli, M. (2013). Structural Strengthening with Prestressed CFRP Strips with Gradient Anchorage. *Journal of Composites for Construction*, 17(October), 651–661. doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000372
- Michels, J., Staśkiewicz, M., Czaderski, C., Lasek, K., Kotynia, R., & Motavalli, M. (2014). Anchorage resistance of CFRP strips externally bonded to various cementitious substrates. *Composites Part B: Engineering*, 63, 50–60. doi:10.1016/j.compositesb.2014.03.017
- Michels, J., Zilie, E., Czaderski, C., & Motavalli, M. (2014). Debonding failure mechanisms in prestressed CFRP/epoxy/concrete connections. *Engineering Fracture Mechanics*, pp. 16–37.

- Motavalli, M., Czaderski, C., & Pfyl-Lang, K. (2011). Prestressed CFRP for Strengthening of Reinforced Concrete Structures: Recent Developments at Empa, Switzerland. *Journal of Composites for Construction*, 15, 194–205.
- Neville, A.M. (1995). Properties of concrete. Pitman Publishing, London.
- Oliveira, D. V., Basilio, I., & Lourenço, P. B. (2011). Experimental Bond Behavior of FRP Sheets Glued on Brick Masonry. *Journal of Composites for Construction*, 15(February), 32–41. doi:10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000147
- Peng, H., Zhang, J., Cai, C. S., & Liu, Y. (2014). An experimental study on reinforced concrete beams strengthened with prestressed near surface mounted CFRP strips. *Engineering Structures*, 79, 222–233. doi:10.1016/j.engstruct.2014.08.007
- Rodrigues, T. (2009). *Reforço de estruturas com FRP 's*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro.
- Sena-Cruz, J. (2002). *Caracterização experimental da ligação de laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento*. Relatório técnico desenvolvido no âmbito do programa de doutoramento. 54p
- Sena-Cruz, J. (2005). *Reforço de estruturas com laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento*. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil, Universidade do Minho.
- Sena-Cruz, J., Barros, J., & Coelho, M. (2010). Comportamento de laminados multi-direccionais de cfrp para a aplicações em engenharia civil. *8º Congresso Nacional de Mecânica Experimental Guimarães*, 10.
- Sena-Cruz, J. (2011). *Apontamentos das disciplinas de Reabilitação e Reforço de Estruturas, Aula 17- Projeto de reforço de FRP*.
- Sena-Cruz, J. M., Barros, J. a O., Coelho, M. R. F., & Silva, L. F. F. T. (2012). Efficiency of different techniques in flexural strengthening of RC beams under monotonic and fatigue loading. *Construction and Building Materials*. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.10.044

- Silva, A. (2013). *Reforço de estruturas de betão armado com CFRP*. Dissertação para obtenção do grau de mestre em engenharia civil, Universidade do Minho.
- Taillade, F., Quiertant, M., Benzarti, K., & Aubagnac, C. (2011). Shearography and pulsed stimulated infrared thermography applied to a nondestructive evaluation of FRP strengthening systems bonded on concrete structures. *Construction and Building Materials*, 25, 568–574. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.02.019
- Teixeira, T., Correia, L., Sena-Cruz, J., & Michels, J. (2014). Reforço à flexão de lajes de betão armado com laminados de cfrp pré-esforçados: comportamento em. *Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, 1–14.
- Wight, R. G., Green, M. F., & Erki, M.-A. (2001). P Restressed Frp S Heets for P Oststrengthening R Einforced, (November), 214–220.
- Xue, W., Zeng, L., & Tan, Y. (2008). Experimental studies on bond behaviour of high strength CFRP plates. *Composites Part B: Engineering*, 39, 592–603. doi:10.1016/j.compositesb.2007.09.002
- You, Y. C., Choi, K. S., & Kim, J. (2012). An experimental investigation on flexural behavior of RC beams strengthened with prestressed CFRP strips using a durable anchorage system. *Composites Part B: Engineering*, 43(8), 3026–3036. doi:10.1016/j.compositesb.2012.05.030