



UNIC

**Centro de Investigação em
Estruturas e Construção da UNL**

**COLUNAS E PILARES DE BETÃO ARMADO
REFORÇADOS COM COMPÓSITOS DE FRP OU COM
BETÕES POLIMÉRICOS**

**CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS: Aço, Betão, Resina
Epoxy, Compósitos de FRP e Betões Poliméricos**

Carlos Chastre Rodrigues

Índice

Lista de figuras	iii
Lista de tabelas	v
Lista de símbolos	vii
1 Introdução	1
2 Caracterização mecânica das armaduras de aço	3
3 Caracterização mecânica do betão	5
3.1 Caracterização experimental do betão tipo BA	5
3.2 Caracterização experimental do betão tipo BB	7
3.3 Síntese da caracterização dos betões BA e BB aos 28 dias	11
4 Resinas Epoxídicas	13
5 Compósitos de FRP	17
5.1 Fibras de carbono - <i>Replark</i>	21
5.2 Fibras de carbono - <i>MBrace</i>	24
5.3 Fibras de vidro - <i>Tyfo</i>	26
6 Ligação FRP-Resina	29
7 Betão Polimérico	35
7.1 Formulação e preparação	36
7.2 Caracterização mecânica	40
7.2.1 Ensaio de tracção por flexão	41
7.2.2 Ensaio de compressão monotónica	42
7.2.3 Ensaio de compressão cíclica	45
7.2.4 Análise dos resultados e conclusões da caracterização mecânica	52
Referências Bibliográficas	55

Lista de Figuras

2.1	Diagrama tensão-deformação do ensaio dos provetes de aço de $\varnothing 12$. . .	4
2.2	Diagrama tensão-deformação do ensaio dos provetes de aço de $\varnothing 6$. . .	4
3.1	Prensa de compressão e pormenor da rotura de um cubo de betão	6
3.2	Diagramas tensão-deformação dos provetes cilíndricos do betão tipo BB	9
3.3	Ensaio de compressão diametral e pormenor da rotura	9
3.4	Ensaio de flexão e pormenor da rotura	10
3.5	Evolução da tensão de rotura ao longo do tempo	10
3.6	Evolução da tensão de rotura ao longo do tempo	11
4.1	Pormenor transversal de um provete de resina com micro bolhas de ar	14
4.2	Pormenores de um ensaio e da rotura de um provete de <i>Epothem Resin</i>	15
4.3	Diagrama tensão-deformação do ensaio dos provetes de <i>Epothem Resin</i>	16
5.1	Máquina de tracção do LabDEC utilizada no ensaio dos provetes de FRP	19
5.2	Fibras e resinas utilizadas no reforço das modelos das colunas e dos pilares	20
5.3	Diagrama tensão-deformação do ensaio dos provetes com uma ou duas camadas de CFRP (<i>Replark 30</i>)	22
5.4	Diagrama tensão-deformação do ensaio dos provetes de CFRP (<i>Replark 30</i>) com a orientação $0^\circ/90^\circ/0^\circ$ e 16 ou 26 mm de largura . .	22
5.5	Pormenores de um ensaio e da rotura de um provete de CFRP (<i>Replark</i>)	23
5.6	Diagrama tensão-deformação dos provetes de CFRP (<i>MBrace CI-30</i>)	24
5.7	Pormenores de um ensaio e da rotura de um provete de CFRP (<i>MBrace CI-30</i>)	25
5.8	Diagrama tensão-deformação dos provetes de GFRP (<i>Tyfo SEH-51</i>) . .	26
5.9	Pormenores de um ensaio e da rotura de um provete de GFRP (<i>Tyfo</i>) .	27
6.1	Geometria dos modelos da ligação FRP-Resina	29
6.2	Pormenores da rotura dos modelos LCR-M, LCR e LVR	31
6.3	Diagrama força-deslocamento dos modelos LCR, LCR-M e LVR	32
7.1	Preparação e aplicação do betão polimérico no pilar P2R	37
7.2	Pormenores do pilar P2R antes e após o reforço	38
7.3	Materiais da <i>Sika</i> utilizados no reforço da sapata do pilar P10	38

7.4	Pormenor das diversas granulometrias das areias utilizadas na composição do betão polimérico	39
7.5	Pormenores da sapata do pilar P10 antes, durante a betonagem e após o reforço	39
7.6	Bateria de moldes com os provetes das séries C e D e prensa do LabDEC utilizada no ensaio dos provetes	40
7.7	Equipamento e pormenor do ensaio de tracção por flexão do provete A1	41
7.8	Pormenores da rotura dos provetes após os ensaios	42
7.9	Diagramas tensão de rotura à tracção versus deslocamento (flecha) obtidos do ensaio à flexão dos provetes de betão polimérico	43
7.10	Diagramas tensão-deformação dos ensaios de compressão monotónica	44
7.11	História de extensões ou tensões aplicadas (A2, B1, B2, C3 e D2) . .	47
7.12	Diagramas tensão-deformação dos provetes A1, A2 e A3	48
7.13	Diagramas tensão-deformação dos provetes B1 e B2	49
7.14	Diagramas tensão-deformação dos provetes C1, C2 e C3	50
7.15	Diagramas tensão-deformação dos provetes D1, D2 e D3	51
7.16	Comparação dos diagramas tensão-deformação de um provete de betão do tipo BB com os betões poliméricos das séries A, C e D	53

Lista de Tabelas

2.1	Resultados dos Ensaios de Caracterização das Armaduras	3
3.1	Tensão de rotura à compressão dos provetes de betão tipo BA	6
3.2	Valor experimental do módulo de elasticidade do betão tipo BA	7
3.3	Tensão de rotura à compressão dos provetes de betão tipo BB	8
3.4	Resistência à tracção por compressão diametral do betão tipo BB	8
3.5	Resistência à tracção por flexão do betão tipo BB	9
3.6	Síntese da caracterização dos betões BA e BB aos 28 dias	12
4.1	Comparação das propriedades das resinas epoxídicas do betão e do aço	13
4.2	Características mecânicas das resinas apresentadas pelos fabricantes	14
4.3	Resultados dos ensaios de caracterização de <i>Epothem Resin (Replark)</i>	15
5.1	Propriedades típicas das fibras	18
5.2	Resultados dos ensaios de caracterização do CFRP (<i>Replark 30</i>)	23
5.3	Resultados dos ensaios de caracterização do CFRP (<i>Mbrace C1-30</i>)	25
5.4	Resultados dos ensaios de caracterização do GFRP (<i>Tyfo SEH-51</i>)	27
6.1	Resultados dos ensaios de caracterização da ligação FRP-resina	30
7.1	Características das resinas <i>Eposil 551</i> e <i>Icosit KC220/60</i>	36
7.2	Características da areia (<i>SP55</i>) utilizada na formulação A	37
7.3	Características das cargas utilizadas na formulação D	37
7.4	Valores dos ensaios de flexão-tracção de betão polimérico	43
7.5	Valores dos ensaios monotónicos de betão polimérico	45
7.6	Valores dos ensaios cíclicos de betão polimérico	52
7.7	Valores médios dos ensaios monotónicos e cíclicos de betão polimérico	53
7.8	Relação entre os valores médios dos ensaios monotónicos e cíclicos	53

Lista de Símbolos

Siglas

ACI	- American Concrete Institute
CFRP	- polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras de carbono (do inglês Carbon Fiber Reinforced Polymers)
ECCS	- European Convention for Constructional Steelwork
ELSA	- European Laboratory of Structural Analysis
EMPA	- Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research
FEMA	- Agência Federal de Gestão de Emergências (do inglês Federal Emergency Management Agency)
FEUP	- Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
FIB	- Fédération Internationale du Béton
FRP	- família dos polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras contínuas (do inglês Fiber Reinforced Polymers)
GFRP	- polímeros (ou compósitos) reforçados com fibras de vidro (do inglês Glass Fiber Reinforced Polymers)
IST	- Instituto Superior Técnico
INEGI	- Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
JSCE	- Japan Society of Civil Engineers
LNEC	- Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LVDT	- transdutor de deslocamentos (do inglês Linear Voltage Displacement Transformer)
NCHRP	- National Cooperative Highway Research Program
REBAP	- Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado
RSA	- Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes
SIA	- Société Suisse de Ingénieurs et des Architectes
UC	- Universidade de Coimbra
UNL	- Universidade Nova de Lisboa
UM	- Universidade do Minho

Notações Escalares Latinas

A_c	- área da secção de betão
A_{conf}	- área da secção transversal do sistema de confinamento
A_e	- área da secção de betão efectivamente confinado
A_f	- área da secção transversal do FRP
A_g	- área total da secção de betão
A_s	- área da armadura ordinária
A_{sl}	- área total de armaduras longitudinais
A_{sw}	- área da armadura transversal
B	- largura da secção de betão
D	- diâmetro ou largura da secção de betão
E	- módulo de elasticidade
E_c	- módulo de elasticidade tangente do betão
E_{cm}	- valor médio do módulo de elasticidade do betão
E_f	- módulo de elasticidade à tracção do FRP
E_{fib}	- módulo de elasticidade à tracção das fibras
E_{fm}	- valor médio do módulo de elasticidade do FRP
E_j	- módulo de elasticidade à tracção do colete de FRP
E_m	- módulo de elasticidade à tracção da matriz
E_r	- módulo de elasticidade à tracção da resina
E_s	- módulo de elasticidade do aço
E_{sec}	- módulo de elasticidade secante do betão
F	- força horizontal
F_m	- valor médio da força
F_y	- força horizontal na cedência
K_0	- rigidez inicial
K_e	- coeficiente de eficácia do confinamento
K_{eff}	- rigidez efectiva
L	- altura total do pilar
L_t	- altura total do pilar incluindo troço da rótula plástica que entra na fundação
M	- momento
M_u	- momento na secção crítica
M_y	- momento de cedência
M_n	- momento nominal de cedência
N	- esforço normal
RDI	- índice de deformação residual
V_{conf}	- volume do sistema de confinamento
V_{fib}	- fracção volumétrica de fibras
V_r	- fracção volumétrica da matriz
V_o	- volume do núcleo de betão confinado
W_{acum}	- energia dissipada acumulada por ciclo
W_d	- energia dissipada em cada ciclo ou amortecimento hysterético
W_s	- energia de deformação elástica

c	- coesão
d	- diâmetro do núcleo de betão confinado, medido em relação à linha média do sistema de confinamento
d_0	- deslocamento de referência
d_{be}	- diâmetro da armadura longitudinal
d_s	- diâmetro do núcleo de betão confinado, medido em relação ao eixo das armaduras transversais
f_c	- tensão de compressão do betão
f_{cc}	- tensão máxima de compressão do betão confinado
f_{cd}	- valor de cálculo da tensão de rotura do betão à compressão
$f_{con,f}$	- tensão de tracção do sistema de confinamento
$f_{c,cub}$	- tensão de rotura à compressão do betão em provetes cúbicos
f_{ck}	- tensão característica de rotura à compressão do betão em provetes cilíndricos
f_{cm}	- valor médio da tensão de rotura à compressão do betão em provetes cilíndricos
$f_{cm,cub}$	- valor médio da tensão de rotura à compressão do betão em provetes cúbicos
$f_{cm,t}$	- valor médio da tensão de rotura à compressão do betão aos t dias
$f_{ct,fl}$	- valor médio da tensão de rotura à tracção por flexão do betão
f_{ctk}	- valor característico da tensão de rotura à tracção do betão
f_{ctm}	- valor médio da tensão de rotura à tracção do betão
f_{e0}	- tensão máxima de compressão do betão não confinado
f_f, f_{fu}	- tensão de rotura à tracção do FRP
f_{fib}	- tensão de rotura à tracção das fibras
f_{fm}	- valor médio da tensão de rotura do FRP
f_{fu}	- tensão de rotura à tracção do FRP
f_j	- tensão de tracção do colete de FRP
f_l	- tensão lateral de confinamento
$f_{l,ef}$	- tensão lateral efectiva de confinamento
$f_{l,eq}$	- tensão lateral equivalente de confinamento
f_m	- tensão de rotura à tracção da matriz
f_{pc}	- tensão de rotura à compressão do betão polimérico
f_{pct}	- tensão de rotura à tracção do betão polimérico
f_{pctm}	- valor médio da tensão de rotura à tracção do betão polimérico
f_r	- tensão de rotura à tracção da resina
f_{su}	- tensão de rotura do aço
f_{sum}	- valor médio da tensão de rotura do aço
f_{sy}	- tensão de cedência do aço
f_{syd}	- valor de cálculo da tensão de cedência do aço
f_{sym}	- valor médio da tensão de cedência do aço
f_t	- tensão máxima no aço
f_y	- tensão de cedência do aço
$f_{0,2m}$	- valor médio da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%

h	- altura da coluna
k_e	- coeficiente de eficácia do confinamento
l_p	- comprimento da rótula plástica
n_K	- rigidez efectiva normalizada
n_{sl}	- número de varões longitudinais
s	- espaçamento das armaduras transversais
s'	- espaçamento livre das armaduras transversais
t	- espessura, tempo
t_{fib}	- espessura das fibras (manta, tecido, etc.)
t_{FRP}	- espessura do FRP
t_j	- espessura do colete de FRP

Notações Escalares Gregas

α	- coeficiente de eficácia do confinamento
γ	- peso volúmico do betão
γ_c	- coeficiente de segurança do betão
γ_s	- coeficiente de segurança do aço
δ	- deslocamento, deslocamento horizontal
δ_f	- deslocamento do FRP
δ_R	- deslocamento da resina
δ_r	- deformação lateral permanente
δ_t	- deslocamento total
δ'_y	- deslocamento no início da cedência
ε	- extensão
ε_{AN}	- extensão no aço, lado Norte
ε_{AS}	- extensão no aço, lado Sul
ε_{BN}	- extensão no betão, lado Norte
ε_{BS}	- extensão no betão, lado Sul
ε_c	- extensão axial de compressão do betão
ε_{cc}	- extensão axial do betão correspondente à tensão máxima de compressão do betão confinado (f_{cc})
$\varepsilon_{c0}, \varepsilon_{c1}$	- extensão axial do betão correspondente à tensão máxima de compressão do betão não confinado f_{c0}, f_{cm}
ε_{fm}	- valor médio da extensão de rotura à tracção do FRP
ε_{fu}	- extensão de rotura à tracção do FRP
ε_j	- extensão de tracção do colete de FRP
ε_l	- extensão lateral de confinamento
ε_{mx}	- extensão máxima
ε_{md}	- extensão média

ε_{pc}	- extensão de rotura do betão polimérico
ε_r	- extensão de rotura da resina
ε_{rm}	- valor médio da extensão de rotura da resina
ε_{sh}	- extensão de endurecimento do aço
ε_{sr}	- extensão do aço na rotura
ε_{srm}	- valor médio da extensão do aço na rotura
ε_{su}	- extensão total no aço para a força máxima
ε_v	- extensão volumétrica
ε_y	- extensão de cedência no aço
θ	- ângulo entre a orientação principal das fibras e o eixo longitudinal do elemento estrutural
θ_p	- rotação plástica
μ_φ	- coeficiente de ductilidade em curvatura
μ_Δ	- coeficiente de ductilidade em deslocamento
$\mu_{d,rot}$	- deslocamento normalizado na rotura
$\mu_{d,Fmax}$	- deslocamento normalizado para a força máxima
$\mu_{F,rot}$	- força normalizada na rotura
$\mu_{F,max}$	- força normalizada para a força máxima
ν	- esforço normal reduzido
ξ_{eq}	- taxa de amortecimento viscoso equivalente
ρ_{conf}	- relação volumétrica do confinamento
ρ_f	- relação volumétrica do FRP de confinamento
ρ_{sc}	- percentagem de armaduras longitudinais em relação à área da secção de betão confinado
ρ_s	- percentagem de armaduras longitudinais em relação à área total da secção de betão
ρ_{sw}	- relação volumétrica de armaduras transversais
σ	- tensão
σ_c	- tensão de compressão no betão
σ_l	- tensão lateral efectiva (de confinamento)
σ_s	- tensão de tracção na armadura
τ	- tensão de aderência
ϕ	- ângulo de atrito interno do material
\emptyset	- diâmetro da armadura
φ	- curvatura
φ_{lp}	- curvatura no topo da rótula plástica
φ_u	- curvatura na secção crítica
φ_y	- curvatura de cedência
ω_j	- percentagem mecânica volumétrica do colete de FRP
ω_w	- percentagem mecânica volumétrica de armaduras transversais

Capítulo 1

Introdução

Apresentam-se neste relatório os resultados dos ensaios de caracterização das propriedades mecânicas dos materiais utilizados nos modelos experimentais de colunas e pilares de betão armado reforçados com compósitos de FRP ou com betões poliméricos.

Neste trabalho experimental foram realizados quarenta e cinco ensaios experimentais de colunas à compressão axial monotónica ou cíclica reforçadas com compósitos de FRP. Mantendo a altura das colunas em 750 mm estudou-se a influência de diversos parâmetros no seu comportamento tal como a geometria da coluna (variação do diâmetro), o tipo de coluna (betão simples ou armado), o nível de cintagem das colunas de betão armado, o tipo de confinamento exterior com FRP (C ou GFRP), o número de camadas de FRP e o tipo de carregamento axial (monotónico ou cíclico).

Realizaram-se igualmente dez ensaios experimentais de modelos reduzidos de pilares por forma a analisar o comportamento à flexão composta sob acções cíclicas de pilares de betão armado de secção circular reforçados com compósitos de FRP. Mantendo a dimensão dos pilares (1500 mm de altura por 250 mm de diâmetro) e sujeitando os modelos a uma história de cargas cíclicas e alternadas estudou-se a influência de diversos parâmetros no seu comportamento tal como o tipo de confinamento exterior com FRP (carbono ou vidro), a altura do reforço, o número de camadas de FRP, o nível de carregamento axial ou o reforço da rótula plástica, substituindo o betão de recobrimento por betão polimérico.

Os materiais testados e que se apresentam neste relatório foram os aços das armaduras, os betões, a resina epoxídica, os compósitos de FRP (carbono e vidro) e os betões poliméricos. Com o objectivo de caracterizar a ligação FRP-resina realizaram-se ensaios, cujos resultados se apresentam na secção 6, página 29. Os ensaios apresentados foram maioritariamente realizados no Laboratório de Estruturas (LabDEC) e no de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Nova de Lisboa.

Capítulo 2

Caracterização mecânica das armaduras de aço

O aço utilizado nos modelos dos pilares foi fornecido como sendo da classe A400, com os varões de $\varnothing 6$ endurecidos a frio e os de $\varnothing 3$ ou de $\varnothing 12$ laminados a quente. Para caracterização do aço foram ensaiados provetes representativos dos varões de aço utilizados, de acordo com a norma europeia [22].

Armaduras	Tipo	f_{ym} (MPa)	$f_{0.2m}$ (MPa)	f_{tm} (MPa)	E_{sm} (GPa)	ε_{sum} (%)	ε_{srm} (%)
$\varnothing 3$	NL	323	–	412	195	23,1	26,2
$\varnothing 6$	ER	–	391	590	198	7,5	9,3
$\varnothing 12$	NR	458	–	553	228	12,3	15,6

Tabela 2.1: Resultados dos Ensaios de Caracterização das Armaduras

Na tabela 2.1 indicam-se os valores médios da tensão de cedência (f_{ym}), tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2% ($f_{0.2m}$) e tensão de rotura à tracção (f_{tm}) para os provetes ensaiados, bem como os valores médios do módulo de elasticidade (E_{sm}) e da extensão total na força máxima (ε_{sum}) e na rotura (ε_{srm}). Os valores obtidos na determinação experimental do módulo de elasticidade do aço apresentam alguma dispersão pelo que se optou por considerar para efeitos de cálculo o valor de 200 GPa proposto no EC2 [8]. Nas figuras 2.1 e 2.2 apresentam-se os diagramas tensão-deformação dos provetes de aço de $\varnothing 12$ e de $\varnothing 6$ ensaiados.

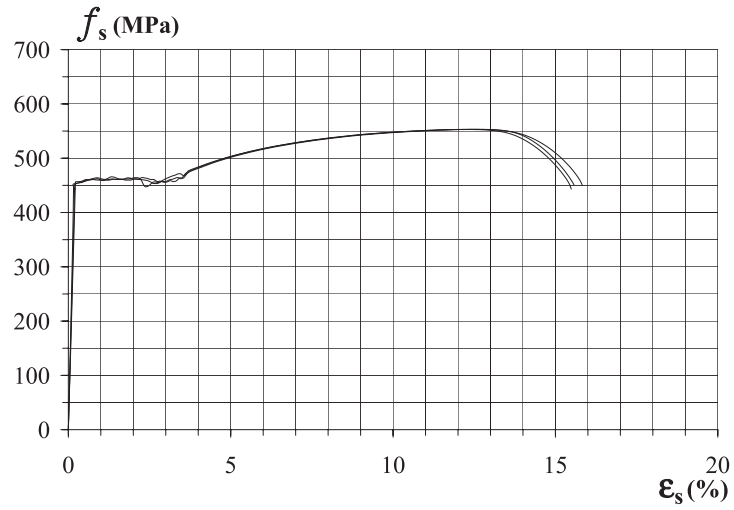


Figura 2.1: Diagrama tensão-deformação do ensaio dos provetes de aço de Ø 12

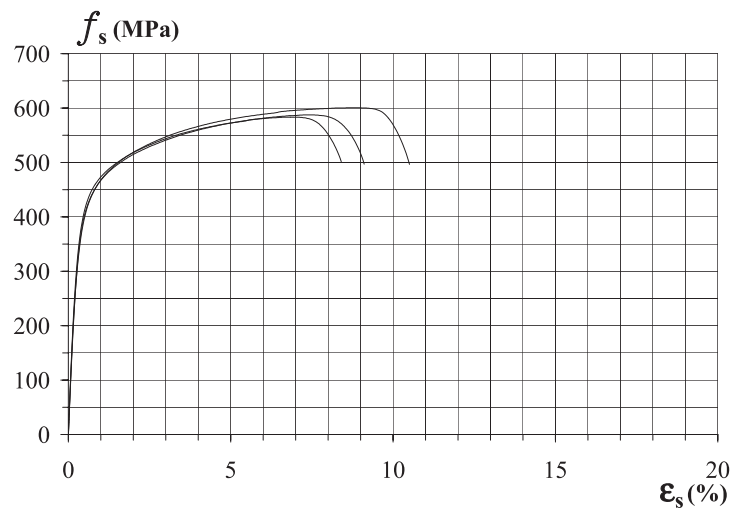


Figura 2.2: Diagrama tensão-deformação do ensaio dos provetes de aço de Ø 6

Capítulo 3

Caracterização mecânica do betão

Foram realizadas duas betonagens, uma primeira (BA), tendo em vista a execução de vinte e oito colunas curtas e uma segunda (BB) tendo em vista a fabricação de mais dezassete colunas e de dez pilares, o que representou um volume total de betão de aproximadamente 6 m^3 . A primeira betonagem foi realizada pela empresa Soares da Costa em Agosto de 1998 durante a execução da estrutura do edifício do Departamento de Engenharia Civil da UNL e a segunda betonagem em Abril de 2002 pela empresa Betão Liz.

A caracterização do betão foi realizada, na primeira betonagem, através de catorze provetes cúbicos de $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ e três provetes cilíndricos de $\varnothing 150 \text{ mm}$ e, na segunda betonagem, através de vinte e quatro provetes cúbicos de $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$, dos quais dois foram rejeitados, seis provetes cilíndricos de $\varnothing 150 \text{ mm}$ e dois provetes prismáticos de $150 \times 150 \times 600 \text{ mm}^3$.

Do ensaio dos provetes cilíndricos obteve-se o valor do módulo de elasticidade, da tensão de rotura à compressão e da resistência à tracção por compressão diametral. Dos provetes cúbicos obteve-se a tensão de rotura à compressão e dos provetes prismáticos, a resistência à tracção por flexão. Apresentam-se nas páginas seguintes os resultados desses ensaios realizados de acordo com a especificação do LNEC E-226-1968 [17] e as normas ASTM [2, 3, 4, 5].

Nas Figuras 3.1, 3.3 e 3.4 é possível observar a prensa onde se realizaram os ensaios e diversos pormenores da rotura dos provetes cúbicos, cilíndricos e prismáticos ensaiados.

3.1 Caracterização experimental do betão tipo BA

Na Tabela 3.1 encontram-se indicados os valores da tensão de rotura à compressão ($f_{cm,cub}$), obtida do ensaio de provetes cúbicos, bem como a respectiva extrapolação para provetes cilíndricos (f_{cm}) de $\varnothing 150$ e 300 mm de altura. Considerou-se para os provetes cúbicos a mesma relação $f_{cm} = 0,839 \times f_{cm,cub}$ utilizada para o betão tipo BB. Não foi possível realizar ensaios no LabDEC aos vinte e oito dias, porque o edifício do Departamento de Engenharia Civil se encontrava em construção. Apresentam-se



Figura 3.1: Prensa de compressão e pormenor da rotura de um cubo de betão

na tabela 3.1 os valores dos ensaios correspondentes aos três, sete e vinte e oito dias (BA.1, BA.2 e BA.3) realizados pela Soares da Costa para controlo do betão em obra (C25/30). Os restantes provetes foram ensaiados no LNEC apenas no início e no final da primeira série dos ensaios das colunas à compressão uniaxial.

Provete		Idade (dias)	f_c (MPa)	$f_{cm,cub}$ (MPa)	f_{cm} (MPa)
Designação	Tipo				
BA.1	cubo	3	22,2	45,3	38,0
BA.2		7	28,9		
BA.3		28	41,5		
BA.4	cubo	342	46,2	47,0	39,4
BA.5			44,4		
BA.6			43,3		
BA.7			47,2		
BA.8			45,6		
BA.9	cubo	720	45,2	47,0	39,4
BA.10			49,8		
BA.11			44,4		
BA.12			47,0		
BA.13			50,4		
BA.14			45,3		

Tabela 3.1: Tensão de rotura à compressão dos provetes de betão tipo BA

O módulo de elasticidade foi determinado experimentalmente para o betão tipo BA, de acordo com o especificado nas normas ASTM [3]. Na Tabela 3.2 encontram-se os valores do módulo de elasticidade dos vários provetes ensaiados e o respectivo valor médio (E_{cm}). É de notar que os valores apresentados correspondem a módulos de

elasticidade secantes, definidos para um nível de tensão de 40% do valor característico da tensão de rotura.

Provete		Idade (dias)	E_{cm} (GPa)	
Designação	Tipo			
BA.15	cilindro	406	25,9	26,1
BA.16			25,8	
BA.17			26,7	

Tabela 3.2: Valor experimental do módulo de elasticidade do betão tipo BA

3.2 Caracterização experimental do betão tipo BB

Apresenta-se na Tabela 3.3 a tensão de rotura à compressão ($f_{cm,cub}$), obtida do ensaio de provetes cúbicos, assim como a respectiva extrapolação para provetes cilíndricos (f_{cm}) de $\varnothing 150$ e 300 mm de altura.

Dos oito cubos ensaiados aos vinte e oito dias de idade, cinco foram mantidos dentro de água durante este período, tendo-se obtido para a tensão de rotura um valor de $f_{cm,cub}=32,4$ MPa. Os outros três foram mantidos em condições de humidade e temperatura idênticas às dos pilares e das colunas e a tensão de rotura obtida foi da mesma ordem de grandeza $f_{cm,cub}=33,1$ MPa. Por esta razão optou-se por considerar para a tensão de rotura o valor médio dos oito cubos - $f_{cm,cub}=32,6$ MPa. Todos os outros provetes foram mantidos até à data do ensaio em condições de humidade e temperatura idênticas às dos pilares e das colunas.

De acordo com os ensaios realizados a relação entre os provetes cúbicos e cilíndricos aos vinte e oito dias é de 0,839 pelo que se adoptou a relação $f_{cm} = 0,839 \times f_{cm,cub}$ sempre que se pretendeu extrapolar para cilindros os resultados dos ensaios realizados em cubos. De acordo com a norma ENV206 [23], e atendendo à amostra de oito cubos ensaiados aos vinte e oito dias, obtém-se um $f_{ck} = 24,9$ MPa (em cilindros), o que corresponde a um betão C20/25.

Na Figura 3.2 apresentam-se a título indicativo os diagramas tensão-deformação dos provetes cilíndricos ensaiados.

Na Tabela 3.4 apresentam-se os resultados experimentais da resistência à tracção por compressão diametral aos vinte e oito dias ($f_{ct,sp} = 2,31$ MPa) e na Tabela 3.5 os resultados da resistência à tracção por flexão do betão tipo BB, no final dos ensaios experimentais dos pilares, aos quatrocentos e cinquenta e cinco dias ($f_{ct,fl} = 3,87$ MPa).

Atendendo à grande quantidade de modelos ensaiados com este tipo de betão (doze pilares e dezassete colunas) optou-se por realizar oito ensaios de cubos e três de cilindros aos vinte e oito dias. Sensivelmente a meio do período do ensaio dos pilares (trezentos e quarenta dias) ensaiaram-se seis cubos e no final dos ensaios das colunas (quatrocentos e quarenta e três dias) ensaiaram-se outros seis provetes (Figura 3.6).

Provete		Idade (dias)	f_c (MPa)	$f_{cm,cub}$ (MPa)	f_{cm} (MPa)
Designação	Tipo				
BB.1	cubo	28	31,8	32,6	27,4
BB.2			31,0		
BB.3			30,8		
BB.4			32,8		
BB.5			35,4		
BB.6	cubo	28	34,7	-	27,4
BB.7			33,4		
BB.8			31,3		
BB.9	cilindro	28	29,2	-	27,4
BB.10			27,1		
BB.11			25,7		
BB.12	cubo	340	41,9	38,9	32,7
BB.13			37,4		
BB.14			38,6		
BB.15			37,9		
BB.16			38,2		
BB.17			39,6		
BB.18	cubo	443	42,8	41,9	35,2
BB.19			41,9		
BB.20			44,4		
BB.21			44,2		
BB.22			38,8		
BB.23			39,4		
BB.24	cubo	701	41,5	40,7	34,1
BB.25			39,9		

Tabela 3.3: Tensão de rotura à compressão dos provetes de betão tipo BB

Provete		Idade (dias)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	
Designação	Tipo			
BB.30	cilindro	28	2,22	2,31
BB.31			2,03	
BB.32			2,69	

Tabela 3.4: Resistência à tracção por compressão diametral do betão tipo BB

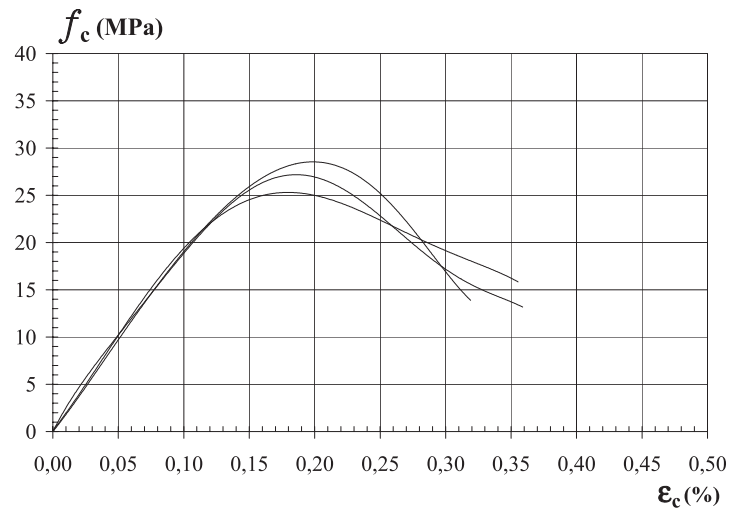


Figura 3.2: Diagramas tensão-deformação dos provetes cilíndricos do betão tipo BB

Provete		Idade (dias)	$f_{ct,fl}$ (MPa)	
Designação	Tipo			
BB.28	prisma	455	3,61	3,87
BB.29			4,12	

Tabela 3.5: Resistência à tracção por flexão do betão tipo BB



Figura 3.3: Ensaio de compressão diametral e pormenor da rotura

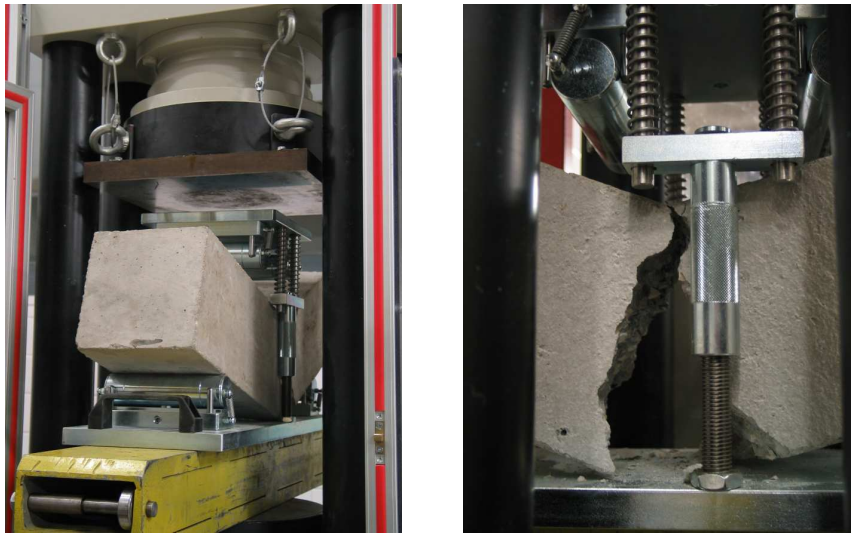


Figura 3.4: Ensaio de flexão e pormenor da rotura

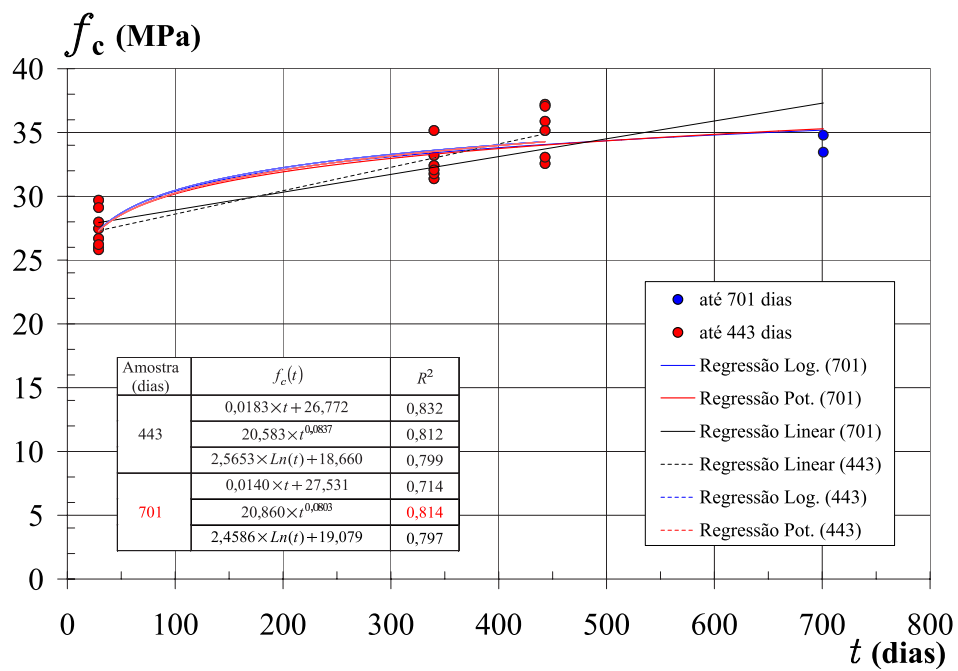


Figura 3.5: Evolução da tensão de rotura ao longo do tempo

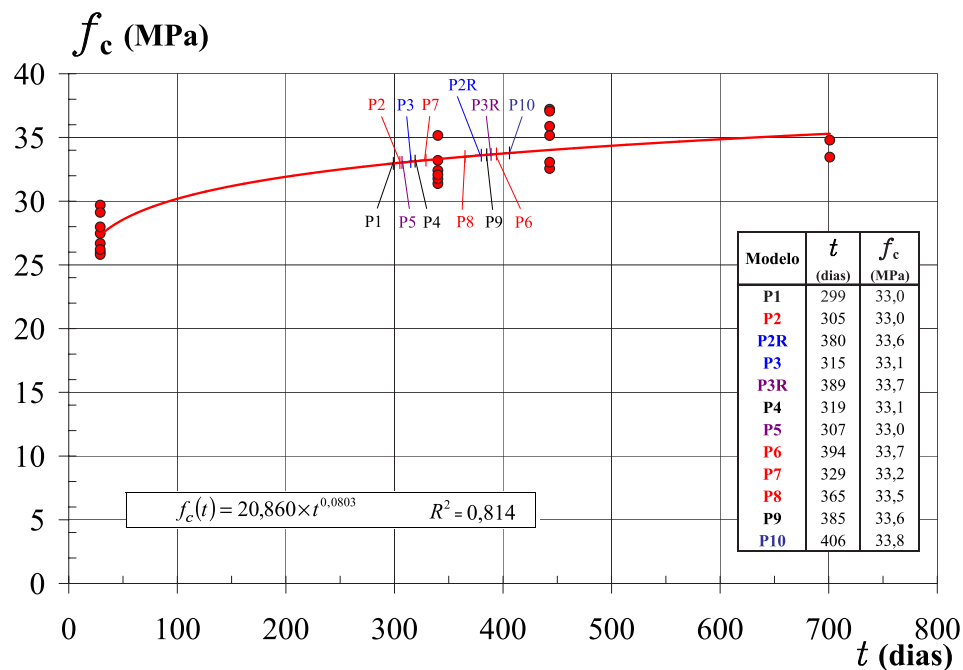


Figura 3.6: Evolução da tensão de rotura ao longo do tempo

Cerca de dois anos após a betonagem (setecentos e um dias) ensaiaram-se os restantes dois cubos por forma a poder calibrar a curva que melhor representasse a evolução do betão ao longo do tempo (Figura 3.5). Na figura 3.6 apresenta-se o andamento desta curva (expressão 3.1), bem como a estimativa da tensão de rotura do betão à data dos ensaios dos pilares P1 a P10.

$$f_{cm,t} = 20,86 \times t^{0,0803} \quad (3.1)$$

3.3 Síntese da caracterização dos betões BA e BB aos 28 dias

Apresenta-se na Tabela 3.6 uma síntese dos resultados da caracterização aos vinte e oito dias dos betões tipo BA e BB indicados anteriormente nas Tabelas 3.1 a 3.4. Nas situações em que não existem resultados determinados experimentalmente aos 28 dias, consideraram-se os valores resultantes das expressões 3.2 a 3.6. As expressões 3.2 e 3.6 foram calibradas através dos resultados experimentais apresentados anteriormente, enquanto as expressões 3.3 a 3.5 encontram-se indicadas no Model Code 90 [21] e no *Bulletin 1* da FIB [9].

$$f_{cm} = 0,839 \times f_{cm,cub} \quad (3.2)$$

Tipo de betão	$f_{cm,cub}$ (MPa)	f_{cm} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	$f_{ct,fl}$ (MPa)	E_c (GPa)
BA	45,3	34,8	2,69	2,99	3,70	25,1
BB	32,7	27,4	2,31	2,57	3,18	22,3

Tabela 3.6: Síntese da caracterização dos betões BA e BB aos 28 dias

$$f_{ctm} = 0,3 \times (f_{cm} - 8)^{\frac{2}{3}} \quad (3.3)$$

$$f_{ct,sp} = \frac{f_{ctm}}{0,9} \quad (3.4)$$

$$f_{ct,fl} = 1,376 \times f_{ctm} \quad (3.5)$$

$$E_c = 4250 \times \sqrt{f_{cm}} \quad (3.6)$$

Capítulo 4

Resinas Epoxídicas

A resina que constitui a matriz polimérica dos compósitos tem como função envolver e proteger as fibras das agressões ambientais por forma a garantir uma transferência adequada dos esforços entre estas e impedir os deslocamentos no sentido do alinhamento das fibras ou transversalmente a estas. Nos tecidos e nas mantas, as resinas assumem igualmente a função de colagem, devendo garantir a aderência das fibras à base e entre camadas.

A resina influi bastante no comportamento do compósito ao corte e à compressão mas exerce uma influência reduzida na resistência à tracção final do mesmo. As características exigíveis às resinas epoxídicas, com função resistente, são: uma boa capacidade de aderência às fibras, um tempo de cura longo, uma baixa retracção durante a cura, um módulo de elasticidade da ordem dos 2 GPa, uma deformação de rotura compatível com as fibras e uma boa estabilidade face aos agentes químicos.

Apresenta-se na Tabela 4.1 uma comparação das propriedades típicas das resinas epoxídicas com as do betão e as do aço.

Propriedades (20 °C)	R. Epoxídicas	Betão	Aço
Resistência à compressão (MPa)	55-110	25-150	200-600
Módulo de elasticidade (GPa)	0,5-20	20-50	205
Resistência à tracção (MPa)	9-30	1-4	200-600
Deformação na rotura por tracção (%)	0,5-5	0,015	25
Coefficiente de Poisson	0,3-0,4	0,2	0,3
Peso específico (kN/m ³)	11-17	25	78
Temperatura de transição vítrea, T _g (°C)	45 - 80	–	–
Coefficiente de dilatação térmica	25-100	11-13	10-15

Tabela 4.1: Comparação das propriedades das resinas do betão e do aço [10]

Os sistemas compósitos de FRP utilizados no âmbito deste trabalho - *Replark*, *MBrace* e *Tyfo*, foram aplicados respectivamente com as resinas *Epothem - L700S*, *MBrace Saturante* e *Tyfo S Epoxy*. Na Tabela 4.2 apresentam-se as características mecânicas destas resinas epoxídicas fornecidas pelos fabricantes [7, 12, 20].

Resina	f_r (MPa)	ε_r (%)	E_r (MPa)
<i>Epothem Resin - L700S</i> [20]	$\geq 29,4$	–	–
<i>MBrace Saturante</i> [7]	54,0	2,5	3034
<i>Tyfo S Epoxy</i> [12]	72,4	5,0	3180

Tabela 4.2: Características mecânicas das resinas apresentadas pelos fabricantes

Por forma a caracterizar mecanicamente a *Epothem Resin - L700S* fabricaram-se provetes de 3 mm de espessura e $10 \times 150 \text{ mm}^2$ de área. A mistura da resina com o endurecedor foi realizada na proporção de 2:1 conforme especificações do fabricante [20]. Na preparação dos provetes utilizou-se um molde com as dimensões aproximadas de $400 \times 400 \text{ mm}^2$ com as faces em vidro, tendo no contorno placas de perspex com 3 mm de espessura, o que permitiu controlar a espessura da chapa de resina. Este molde foi vedado lateralmente e foi vertida a resina para o seu interior, tentando eliminar as bolhas de ar que se iam formando. Contudo, não foi possível eliminar as micro bolhas de ar como se pode observar no pormenor transversal de um provete de resina apresentado na Figura 4.1. Após a cura, a chapa de resina foi retirada do molde e cortada de acordo com as dimensões pretendidas.



Figura 4.1: Pormenor transversal de um provete de resina com micro bolhas de ar

Foram ensaiados quatro provetes de acordo com as normas ISO [16] à velocidade de 1 mm/min. Apresenta-se na Figura 4.2 dois pormenores de um dos ensaios da *Epothem Resin* antes e após a rotura. Na Figura 4.3 apresentam-se os diagramas tensão-deformação dos provetes ensaiados e na Tabela 4.3 indicam-se os valores obtidos para cada provete da tensão de rotura à tracção (f_r), extensão na rotura (ε_r) e do módulo de elasticidade (E). Complementarmente apresenta-se para cada uma destas grandezas o seu valor médio, desvio padrão e coeficiente de variação.

Constata-se alguma variabilidade nos resultados obtidos (f_r , ε_r). Contudo, a média dos valores dos provetes que apresentam melhor comportamento (R-3 e R-4) é semelhante ao valor indicado pelo fabricante e os valores obtidos para o módulo de elasticidade têm um coeficiente de variação de apenas 8,4%. A diminuição da capacidade resistente dos provetes de resina deve-se provavelmente às micro bolhas de ar que não se conseguiu eliminar totalmente.

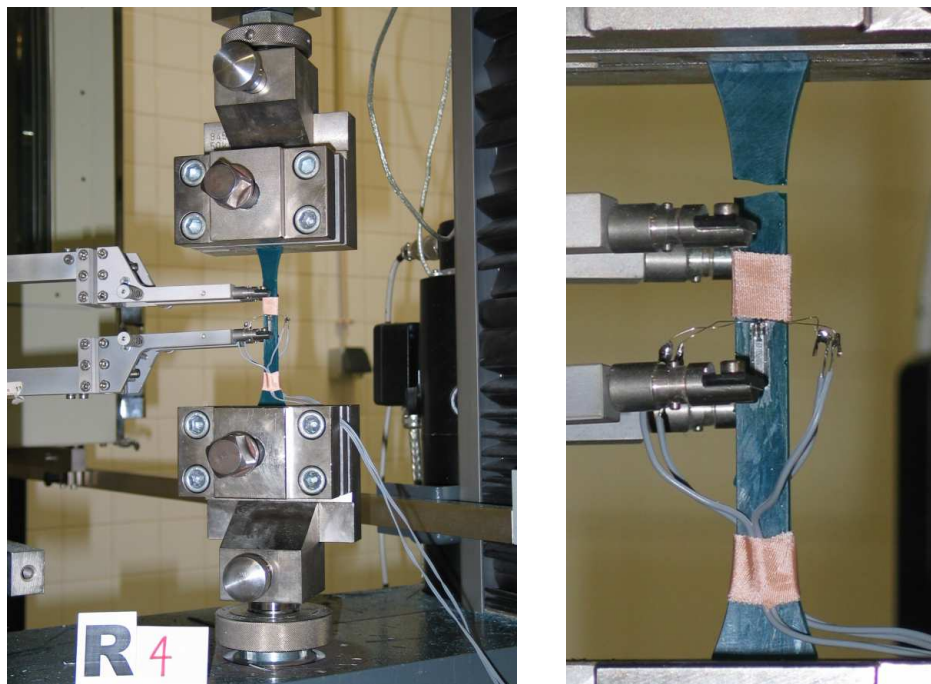


Figura 4.2: Pormenores de um ensaio e da rotura de um provete de *Epotharm Resin*

Provete	f_r (MPa)	f_{rm} (MPa)	ε_r (%)	ε_{rm} (%)	E_r (MPa)	E_{rm} (MPa)
R-1	17,4		0,61		2679	
R-2	17,9	23,6	0,71	0,94	2216	2433
R-3	29,4		1,25		2329	
R-4	29,7		1,18		2506	
Valor médio	23,6		0,94		2433	
Desvio padrão	7		0,33		203	
Coef. de variação (%)	29,1		34,5		8,4	
<i>Epotharm Resin</i> [20]	$\geq 29,4$		-		-	

Tabela 4.3: Resultados dos ensaios de caracterização de *Epotharm Resin* (*Replark*)

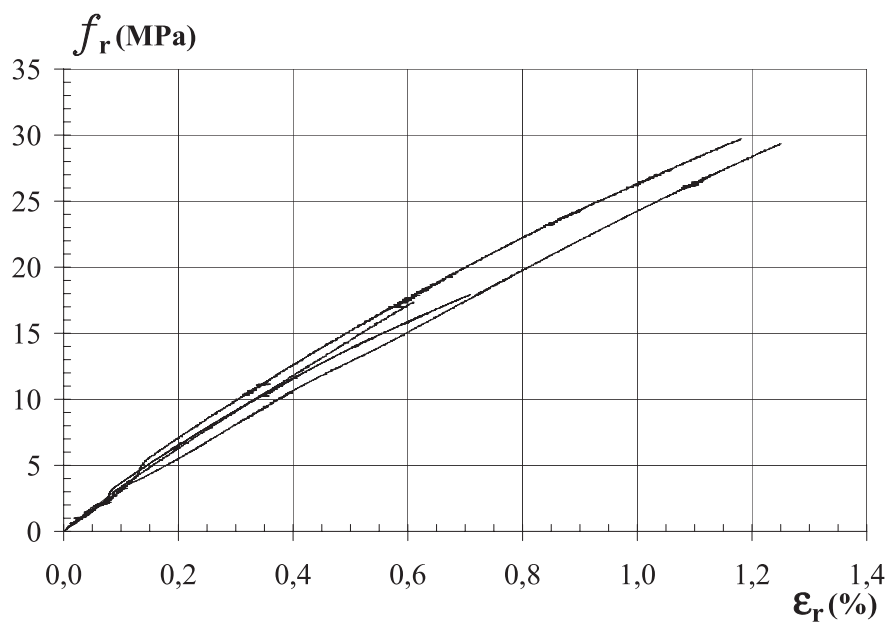


Figura 4.3: Diagrama tensão-deformação do ensaio dos provetes de *Epotherm Resin*

Capítulo 5

Compósitos de FRP

Os compósitos de FRP são materiais constituídos essencialmente por fibras com elevada resistência à tracção, elevado módulo de elasticidade e frágeis e, além disso, por uma matriz polimérica dúctil e termoendurecível, interligando as fibras.

A resistência à corrosão, o baixo quociente peso/resistência mecânica, a sua moldabilidade, a facilidade de aplicação e a eliminação de estruturas de suporte contribuem para o uso crescente de compósitos de matriz orgânica em reforço estrutural. Razões de natureza económica têm feito concentrar essas aplicações em compósitos reforçados por fibras de vidro ou de carbono (G ou CFRP), materiais sobre os quais incide intensa investigação.

As fibras de grafite ou de carbono são produzidas submetendo fibras de base orgânica (acrílico ou alcatrão) a tratamentos térmicos elevados (1000 °C a 3000 °C), por forma a que se transformem em carbono por pirólise. Para a obtenção das fibras de grafite são necessárias temperaturas na ordem dos 3000 °C [15]. Como resultado deste processo, obtêm-se, por um lado, as fibras de carbono (HR) de baixo módulo de elasticidade e grande resistência à tracção, em que a percentagem de carbono ronda os 95%, por outro lado, as fibras de grafite (HM) com um elevado módulo de elasticidade, em que a percentagem de carbono atinge os 99% e o custo final chega a quintuplicar o das fibras de carbono [14].

As fibras de vidro são obtidas pela mistura de diferentes composições, baseando-se na química do vidro para atingir as propriedades físicas (resistência à tracção e módulo de elasticidade) ou químicas (resistência aos alcális) desejadas. Possuem baixa rigidez, menor resistência à fadiga e muito boa flexibilidade. O seu custo de fabrico ronda os 10% do custo das fibras de carbono.

Existem outros tipos, como é o caso das fibras aramídicas que são fibras orgânicas e sintéticas, obtidas por extrusão e trefilação, pouco aderentes a matrizes termoplásticas, muito tenazes, sendo por isso algo restrita a sua utilização na construção civil. O processamento (separação e corte) das fibras de aramida é muito difícil [26]. O seu custo de fabrico é da ordem do custo das fibras de carbono.

As fibras de boro foram das primeiras a serem utilizadas nos compósitos estruturais [15]. São constituídas por um revestimento de boro num substracto de tungsténio ou carbono e têm no binómio resistência (3500 MPa) - módulo de elasticidade (400 GPa)

Propriedades (20°C)	Carbono HM	Carbono HR	Vidro E	Aramida (Kevlar)
Resistência à tracção (MPa)	2500-3100	3500 - 4800	1900-3000	3600
Mód. de elasticidade (GPa)	350-500	215-235	70	135
Deformação na rotura (%)	0,5-0,9	1,4 - 2,0	3,0 - 4,5	2,5
Peso específico (kN/m ³)	18,1	17,5	25,5	14,5

Tabela 5.1: Propriedades típicas das fibras [10]

um comportamento superior à grafite. Apresentam, contudo, uma densidade 25 a 40% superior. Os compósitos boro-epoxy e boro-alumínio são utilizados em elementos estruturais na indústria aeroespacial; no entanto, o seu elevado custo tem limitado a sua aplicação a outras utilizações [14].

Apresentam-se na Tabela 5.1 valores típicos das propriedades das fibras mais correntes. Cruzando estes valores com os já apresentados na Tabela 4.1, onde se fez uma comparação das propriedades típicas das resinas epoxídicas com o betão e o aço, constata-se que as matrizes poliméricas têm propriedades que limitam significativamente as tensões a que as fibras poderiam trabalhar.

Saliente-se que os compósitos à base de carbono ou de fibras aramídicas apresentam, por vezes, coeficientes de expansão térmica incompatíveis com o betão. Além disso, a exposição destes materiais a altas temperaturas poderá causar degradação prematura e colapso (algumas resinas epoxídicas começam a perder as suas características entre os 45 e os 70 °C) [10].

Contrariamente ao aço, que tem um comportamento elastoplástico, os compósitos em geral apresentam um comportamento elástico linear até à rotura sem patamar de cedência ou deformações plásticas, o que se traduz numa redução de ductilidade. Em termos de custos comparativos com o aço a desvantagem é considerável se se tiver por base apenas o peso do material. A comparação será menos desfavorável se se tomar também em linha de conta o factor resistência.

Em função dos materiais constituintes, da forma e da técnica de reforço, existem diversos sistemas exteriores de reforço com compósitos de FRP. Em geral estes podem subdividir-se em sistemas curados "*in situ*" e em sistemas pré-curados ou pré-fabricados [1, 10]. Os sistemas saturados e curados "*in situ*" consistem em impregnar no local os fios, as mantas ou os tecidos (unidireccionais ou multidireccionais) de fibra com uma resina de saturação, que serve também para ligar as fibras de FRP à superfície de betão, normalmente após a aplicação de um primário. Alguns destes sistemas, como por exemplo o *Replark*, vêm por vezes pré-impregnados com uma resina não curada. Os sistemas pré-curados ou pré-fabricados têm diversas formas que vão desde os varões às chapas, aos coletes ou aos estribos que se encontram pré-curados e são colados ao betão utilizando adesivos.

No reforço dos pilares com compósitos de FRP foram utilizados sistemas saturados e curados "*in situ*" em que se utilizaram tecidos de fibra de carbono - *MBrace C1-30* impregnados com a resina *MBrace Saturante* e tecidos de fibra de vidro - Tyfo

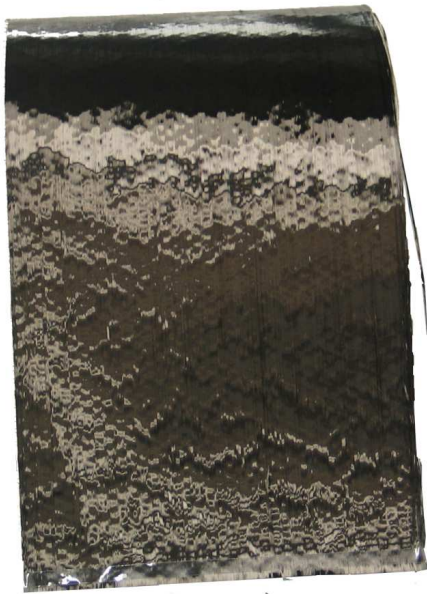
SEH-51 saturados com a resina *Tyfo S Epoxy*. Estes dois sistemas correspondem a dois processos diferentes de aplicação: no sistema *MBrace* aplica-se a resina uniformemente sobre a superfície de betão e coloca-se posteriormente o tecido seco sobre esta superfície, enquanto no sistema *Tyfo* faz-se primeiro a impregnação do tecido com a resina num equipamento de saturação e posteriormente procede-se à aplicação deste sobre a superfície de betão.

No reforço das colunas sujeitas à compressão axial, além dos sistemas anteriores, foi utilizado um outro sistema pré-impregnado e curado "*in situ*" de mantas de fibra de carbono - *Replark 30* e *Epothem Resin*. Na Figura 5.2 é possível observar os diversos componentes dos sistemas compósitos de FRP utilizados no âmbito deste trabalho de investigação.

Nas secções seguintes apresentam-se os resultados da caracterização mecânica dos compósitos de FRP empregues no reforço das colunas e pilares ensaiados no LabDEC. O equipamento utilizado para a realização dos ensaios foi uma máquina de tracção universal da *Zwick* (Figura 5.1) com capacidade de carga de 50 kN. Os procedimentos de ensaio, bem como a velocidade constante dos mesmos (2mm/min) foram realizados de acordo com as normas ASTM D3039/D 3039M [6].



Figura 5.1: Máquina de tracção do LabDEC utilizada no ensaio dos provetes de FRP



Fibra de carbono - *Replark 30*



Fibra de carbono - *MBrace C1-30*



Epotharm Resin



MBrace Saturante



Tyfo S Epoxy e Fibra de vidro - Tyfo SEH-51

Figura 5.2: Fibras e resinas utilizadas no reforço das modelos das colunas e dos pilares

5.1 Fibras de carbono - *Replark*

Foram preparados e ensaiados treze provetes representativos do sistema *Replark 30* e *Epothem Resin* com a finalidade de caracterizar o compósito de FRP.

As fibras de carbono unidireccionais de 300 g/m^2 e as resinas utilizadas foram fornecidas pela *Mitsubishi Chemical Corporation* e têm a designação comercial de *Replark 30* e *epothem-L700S*, respectivamente. A mistura da resina com o endurecedor foi realizada na proporção de 2:1 conforme especificações do fabricante [20].

Foram fabricadas diversas placas de CFRP com uma (0°), duas ($0^\circ/0^\circ$) e três camadas ($0^\circ/90^\circ/0^\circ$), com 300 mm de largura por 250 mm de comprimento. Para a execução das placas foi utilizada uma superfície de vidro como base, sobre a qual se começou por dar uma primeira passagem com um rolo impregnado em resina; em seguida colocou-se a primeira camada de fibra orientada a 0° e aplicou-se outra camada de resina. No caso das placas com duas ou três camadas de fibra aguardou-se cerca de 20 a 30 minutos para que pudesse haver impregnação total da resina e repetiu-se o procedimento anterior até à última camada, ou seja, após a colocação da resina colocou-se a camada de fibra com a orientação pretendida, 0° no caso das placas com duas camadas de fibra ou 90° no caso das placas com três camadas até se terminar o processo com a camada final de resina.

Após o fabrico as placas foram deixadas em cura à temperatura ambiente e humidade relativa do laboratório, findo a qual foram cortados e preparados os provetes com as dimensões pretendidas. Em média os provetes CM-1 a CM-9 tinham $16 \times 250 \text{ mm}^2$, enquanto os provetes CM-10 a CM-13 tinham $26 \times 250 \text{ mm}^2$. Os provetes CM-1 a CM-3 dispunham de uma camada orientada a 0° , os provetes CM-4 a CM-6 de duas camadas orientadas a $0^\circ/0^\circ$ e os provetes CM-7 a CM-13 de três camadas orientadas a $0^\circ/90^\circ/0^\circ$.

Trinta dias após o fabrico os provetes foram ensaiados à tracção, tendo-se obtido em cada série os diagramas tensão-deformação, os valores da tensão (f_f) e extensão máximas (ε_f), bem como o valor do módulo de elasticidade (E_f) em cada provete. Apresentam-se na Tabela 5.2 os resultados destes ensaios e nas Figuras 5.3 e 5.4 os respectivos diagramas tensão-deformação. A espessura de cálculo considerada para o compósito foi de 0,167 mm por camada colocada a 0° [18, 19]. Na Figura 5.5 pode observar-se o pormenor de um ensaio e da rotura de um provete de CFRP.

Nos ensaios CM1 a CM6 cujas camadas estão orientadas a 0° verifica-se que os valores médios da tensão na rotura e do módulo de elasticidade são respectivamente 3339 MPa e 226 GPa, valores que se encontram ligeiramente abaixo dos 3400 MPa e 230 GPa referidos pelo fabricante [20]. A extensão média na rotura foi de 1,44%.

Da análise da Tabela 5.2 é possível constatar que os provetes CM-7 a CM-9 e CM-10 a CM-13 apresentam um valor médio da tensão de rotura respectivamente de 18% e 23% inferior ao valor médio obtido nos provetes CM1 a CM6. Esta situação também é possível observar nas Figuras 5.3 e 5.5 e parece ser motivada pela existência nestes provetes da camada intermédia orientada a 90° , o que provoca uma rotura precoce dos provetes de CFRP.

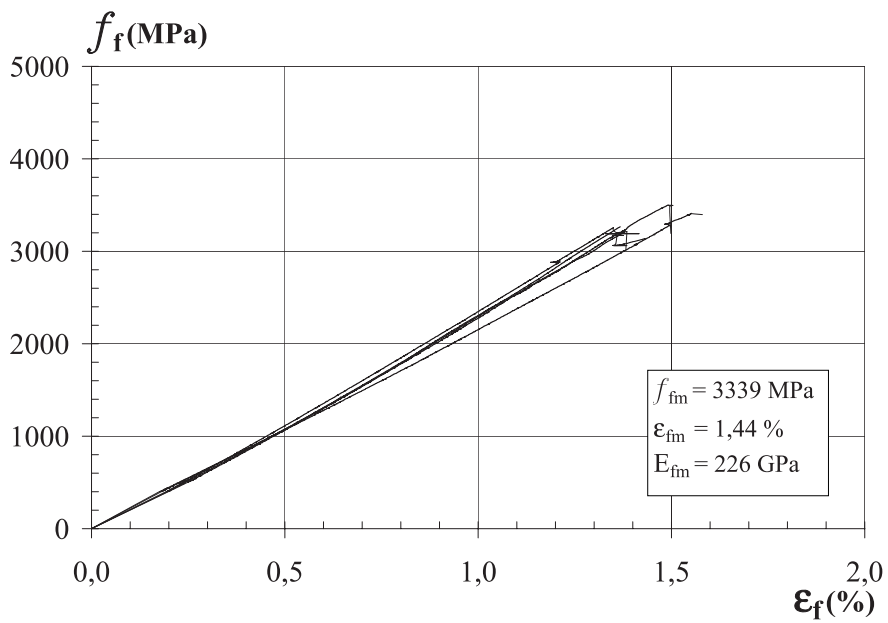


Figura 5.3: Diagrama tensão-deformação do ensaio dos provetes com uma ou duas camadas de CFRP (*Replark 30*)

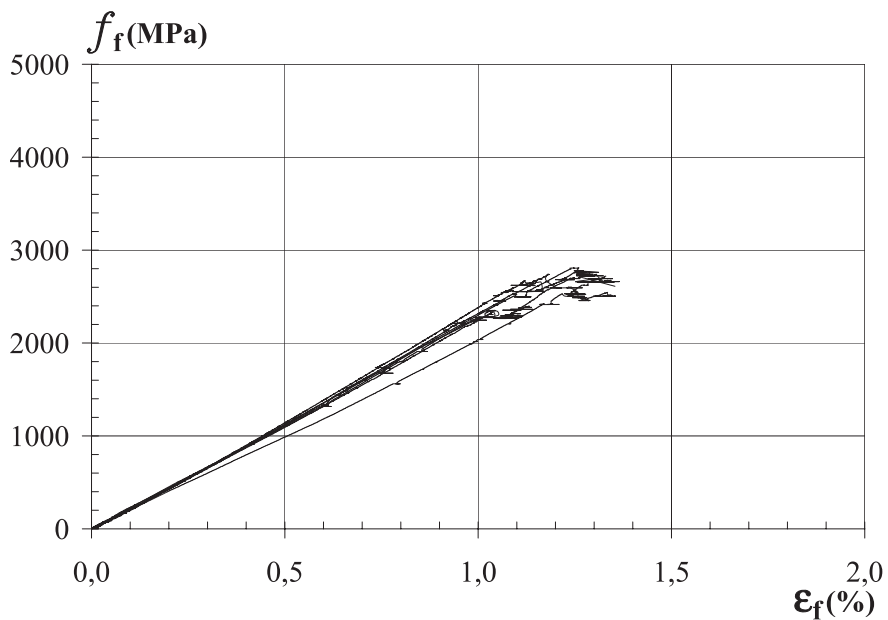


Figura 5.4: Diagrama tensão-deformação do ensaio dos provetes de CFRP (*Replark 30*) com a orientação 0°/90°/0° e 16 ou 26 mm de largura

Provete	Orientação das camadas	f_f (MPa)	f_{fm} (MPa)	ε_f (%)	ε_{fm} (%)	E_f (GPa)	E_{fm} (GPa)
CM-1	0°	3177	3361	1,36	1,42	229	232
CM-2		3498		1,49		237	
CM-3		3407		1,42		228	
CM-4	0°/0°	3327	3317	1,45	1,46	230	220
CM-5		3214		1,38		220	
CM-6		3412		1,55		209	
CM-7	0°/90°/0°	2711	2744	1,26	1,24	218	231
CM-8		2738		1,18		241	
CM-9		2782		1,26		234	
CM-10	0°/90°/0°	2397	2559	1,13	1,19	209	215
CM-11		2811		1,26		225	
CM-12		2720		1,33		194	
CM-13		2309		1,03		231	
Média CM-1:CM-6	0° + 0°/0°	3339	124	1,44	0,07	226	9,8
Desvio padrão		3,7		5,0		4,4	
Coef. de variação (%)		–		–		230	
Replark 30 [20]	–	3400	–	–	–	230	–

Tabela 5.2: Resultados dos ensaios de caracterização do CFRP (Replark 30)

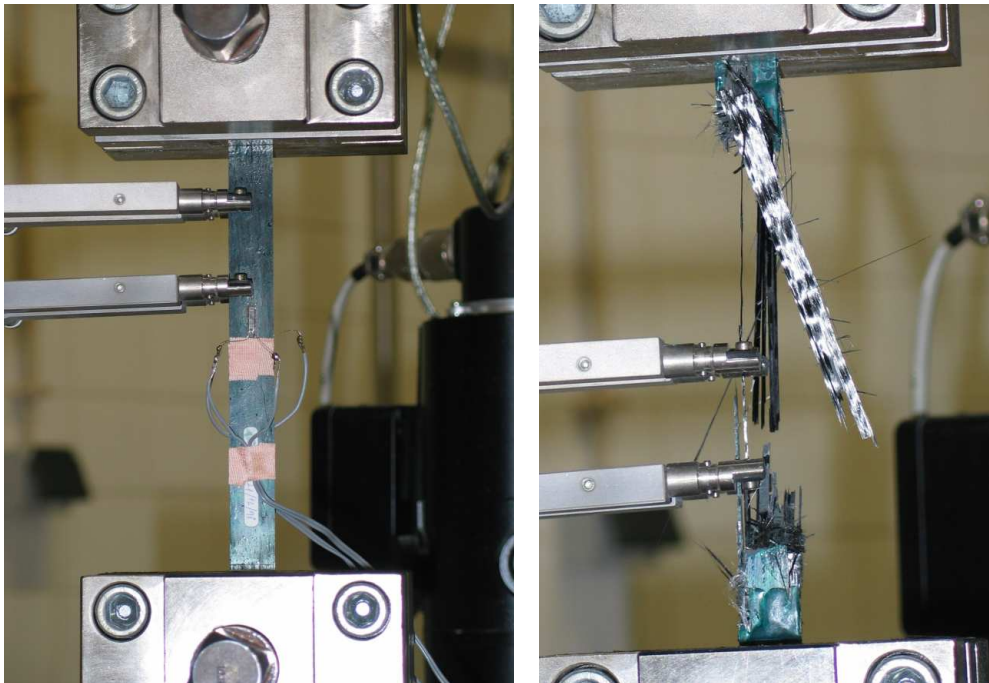


Figura 5.5: Pormenores de um ensaio e da rotura de um provete de CFRP (Replark)

5.2 Fibras de carbono - *MBrace*

Preparam-se e ensaiaram-se dez provetes representativos do sistema *MBrace* com duas camadas ($0^\circ/0^\circ$), com o intuito de caracterizar o compósito de FRP. As fibras de carbono unidireccionais de 300 g/m^2 e as resinas utilizadas foram fornecidas pela *Bettor MBT* e têm a designação comercial de *MBrace C1-30* e *MBrace Saturante* respectivamente. A mistura da resina com o endurecedor foi realizada na proporção especificada [7].

Os procedimentos efectuados na execução dos provetes de CFRP foram idênticos aos descritos para o sistema *Replark*. Em média, as dimensões dos provetes eram de $25 \times 250 \text{ mm}^2$. Com a realização dos ensaios de tracção obtiveram-se os resultados que se apresentam na Tabela 5.3 e os correspondentes diagramas tensão-deformação que se apresentam na Figura 5.6. A espessura de cálculo considerada para o compósito foi de $0,176 \text{ mm}$ por camada colocada a 0° [7]. Na Figura 5.7 é possível observar o pormenor de um ensaio e da rotura de um provete de CFRP.

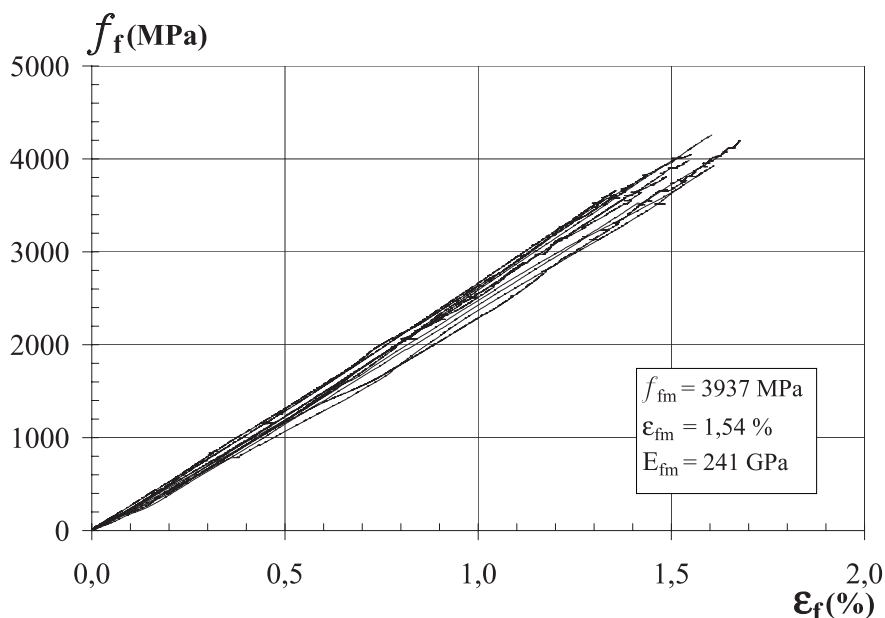
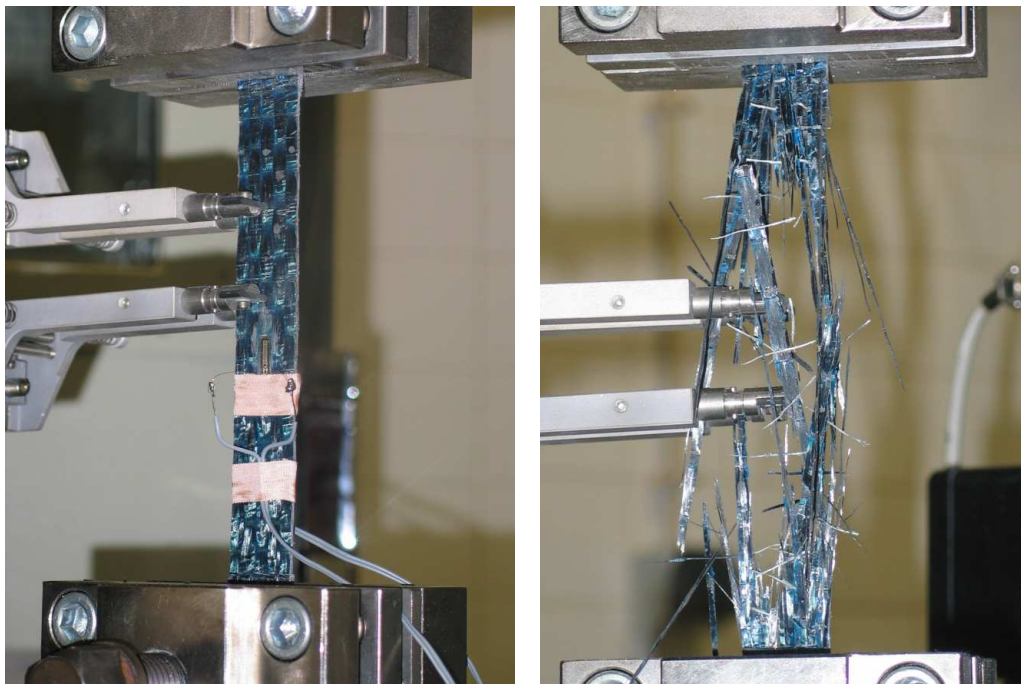


Figura 5.6: Diagrama tensão-deformação dos provetes de CFRP (*MBrace C1-30*)

Da análise da Tabela 5.3 é possível constatar que os valores médios da tensão na rotura e do módulo de elasticidade são respectivamente 3937 MPa e 241 GPa, valores que se encontram acima dos 3800 MPa e 240 GPa referidos pelo fabricante [7]. A extensão média na rotura foi de 1,54%.

Provete	f_f (MPa)	f_{fm} (MPa)	ε_f (%)	ε_{fm} (%)	E_f (GPa)	E_{fm} (GPa)
cfrp-1	3925	3937	1,61	1,54	222	241
cfrp-2	4199		1,68		207	
cfrp-3	4258		1,60		243	
cfrp-4	4047		1,55		265	
cfrp-5	3658		1,36		273	
cfrp-6	3807		1,49		250	
cfrp-7	3717		1,40		236	
cfrp-8	3692		1,53		254	
cfrp-9	4085		1,64		230	
cfrp-10	3983		1,55		233	
Valor médio	3937		1,54		241	
Desvio padrão	214		0,10		20	
Coef. de variação (%)	5,4		6,6		8,3	
<i>MBrace CI-30</i> [7]	3900		1,55		240	

Tabela 5.3: Resultados dos ensaios de caracterização do CFRP (*MBrace CI-30*)Figura 5.7: Pormenores de um ensaio e da rotura de um provete de CFRP (*MBrace CI-30*)

5.3 Fibras de vidro - Tyfo

A caracterização do compósito de GFRP foi realizada utilizando seis provetes representativos do sistema *Tyfo* com duas camadas ($0^\circ/0^\circ$). As fibras de vidro unidireccionais de 915 g/m^2 [13] e as resinas empregues têm a designação comercial de *Tyfo SEH-51* e *Tyfo S Epoxy* respectivamente. A mistura da resina com o endurecedor foi realizada na proporção especificada [12].

Exceptuando o facto de o tecido ter sido previamente saturado antes da aplicação, todos os outros procedimentos de execução dos provetes de GFRP se mantiveram idênticos aos descritos para os sistemas anteriores. Em média as dimensões dos provetes eram de $25 \times 250 \text{ mm}^2$. Nos ensaios de tracção obteve-se para cada provete o respectivo diagrama tensão-deformação (Figura 5.8). Os resultados destes ensaios apresentam-se na Tabela 5.4. A espessura de cálculo considerada para o compósito (fibra e matriz) foi de $1,27 \text{ mm}$ por camada colocada a 0° [13]. Na Figura 5.9 é possível observar o pormenor de um ensaio e da rotura de um provete de GFRP.

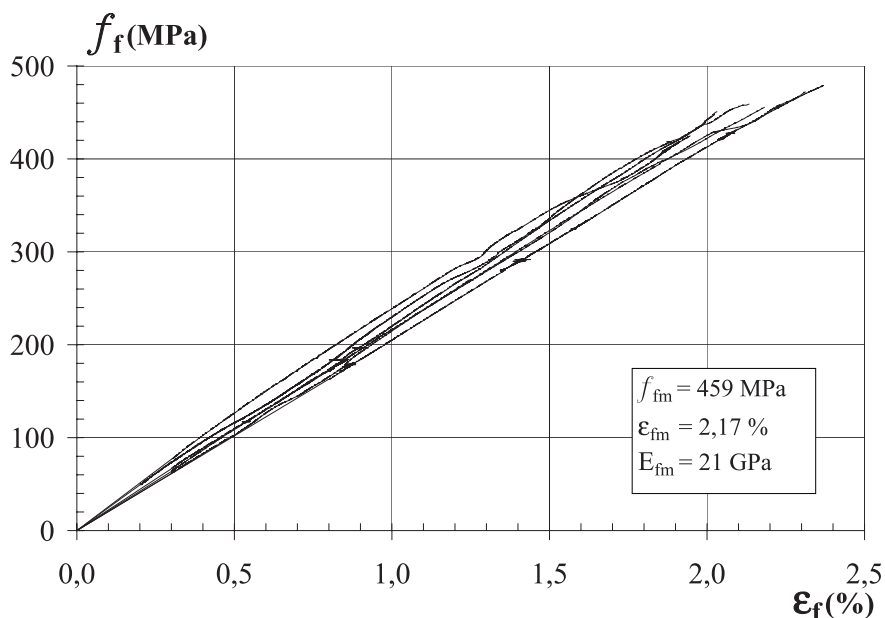
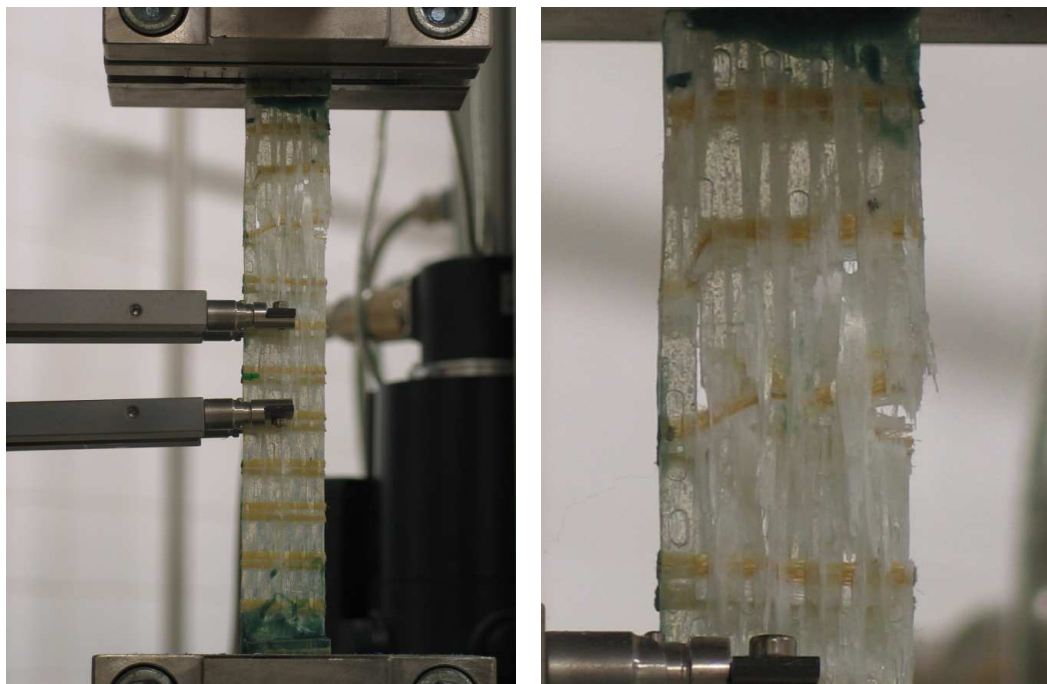


Figura 5.8: Diagrama tensão-deformação dos provetes de GFRP (*Tyfo SEH-51*)

Os valores médios da tensão na rotura, extensão na rotura e do módulo de elasticidade são respectivamente 459 MPa , $2,17\%$ e 21 GPa (Tabela 5.4). Torna-se difícil comparar os resultados obtidos experimentalmente com os valores apresentados pelo fabricante [11, 13] dado que os valores por este apresentados variam em função do documento consultado.

Provete	f_f (MPa)	f_{fm} (MPa)	ε_f (%)	ε_{fm} (%)	E_f (GPa)	E_{fm} (GPa)
gfrp-1	472	459	2,31	2,17	20	21
gfrp-2	479		2,37		17	
gfrp-3	440		2,00		25	
gfrp-4	459		2,13		21	
gfrp-5	451		2,03		23	
gfrp-6	456		2,18		22	
Valor médio	459		2,17		21	
Desvio padrão	14		0,15		3	
Coef. de variação (%)	3,1		6,9		13,9	
<i>Tyfo SEH-51</i> [11, 13]	414 - 575		2,0 - 2,2		20,7 - 27,6	

Tabela 5.4: Resultados dos ensaios de caracterização do GFRP (*Tyfo SEH-51*)Figura 5.9: Pormenores de um ensaio e da rotura de um provete de GFRP (*Tyfo*)

Capítulo 6

Ligação FRP-Resina

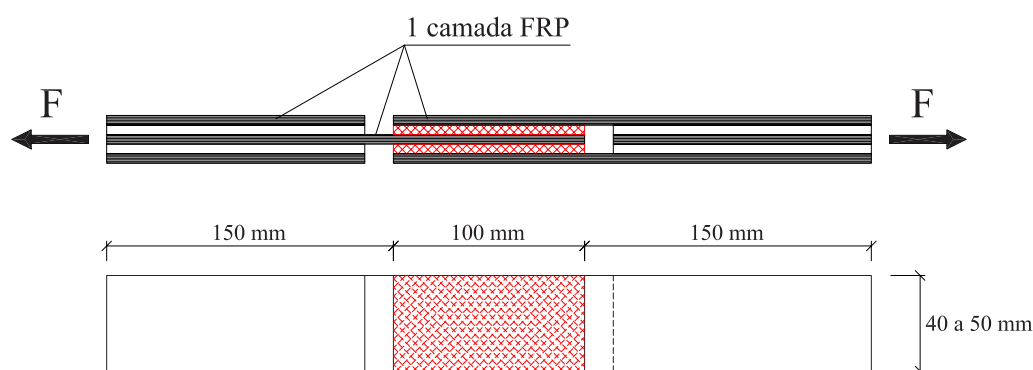


Figura 6.1: Geometria dos modelos da ligação FRP-Resina

Onze ensaios de tracção de modelos da ligação com a geometria apresentada na Figura 6.1 foram realizados, tendo por objectivo a caracterização do comportamento da ligação FRP-resina correspondentes a uma junta de duplo recobrimento. Dos onze modelos ensaiados seis correspondem à ligação LCR (sistema *Mbrace*), dois à ligação LCR-M (sistema *Replark*) e os restantes três à ligação LVR (sistema *Tyfo*). A velocidade de ensaio dos provetes foi de 2 mm/min.

A preparação e a execução dos provetes foi realizada com o mesmo tipo de materiais e os mesmos procedimentos utilizados com os modelos das colunas ou dos pilares e de acordo com as especificações dos respectivos fabricantes [7, 11, 20].

Na Figura 6.2 para além do posicionamento do extensómetro mecânico em cada provete é possível observar alguns pormenores dos diferentes modos de rotura ocorridos nos ensaios.

Nos diagramas força - deslocamento da ligação LCR, LCR-M e LVR apresentados na Figura 6.3 mostra-se o andamento dos ensaios em função dos deslocamentos δ_T (a preto), δ_f (a azul) e δ_R (a vermelho). O deslocamento total δ_T foi obtido através de um extensómetro mecânico cujo afastamento entre garras era de 30 mm. Como se pode comprovar na Figura 6.2 uma das garras do extensómetro foi colocada 15 mm fora da

ligação e a outra 15 mm dentro. Assim, para se obter o deslocamento δ_R considerou-se que:

$$\delta_R = \delta_T - \delta_f \quad (6.1)$$

com

$$\delta_f \simeq 15 \times \varepsilon_f \quad (6.2)$$

e

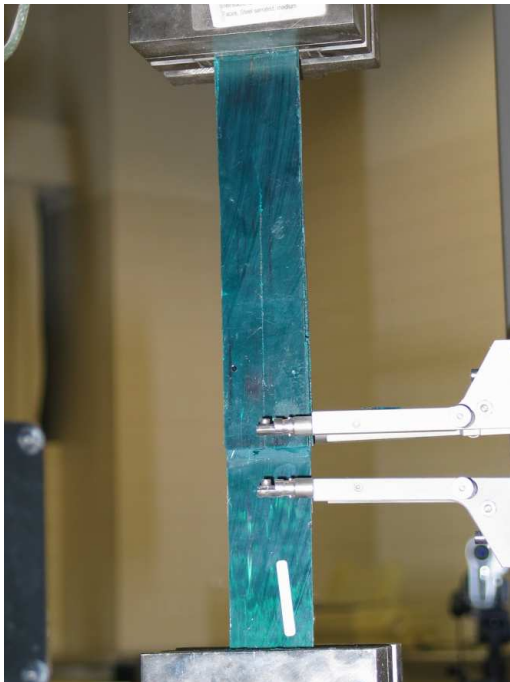
$$\varepsilon_f = \frac{F}{E_f \times A_f} \quad (6.3)$$

Assumiu-se um comportamento elástico linear até à rotura do FRP com o módulo de elasticidade (E_f) igual a 241 GPa (LCR), 226 GPa (LCR-M) ou a 21 GPa (LVR) consoante o tipo de material do provete e a respectiva área da secção A_f .

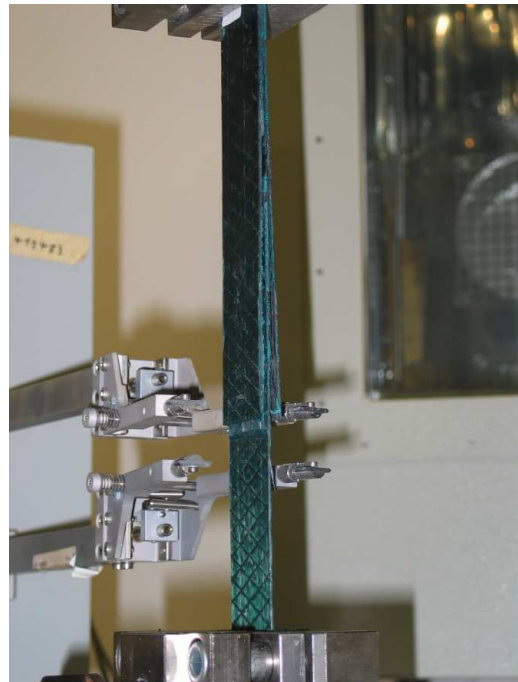
Na Tabela 6.1 apresentam-se os resultados obtidos por tipo de modelo, com a indicação para cada ensaio dos valores da força (F), do deslocamento total medido (δ_T), do deslocamento devido ao FRP (δ_f), do deslocamento na resina (δ_R) e da tensão de aderência (τ) na rotura. Para os modelos LCR e LVR são igualmente indicados o valor médio da tensão de aderência (τ_m), o desvio padrão e o coeficiente de variação para cada uma das referidas grandezas.

Modelo	F (kN)	δ_T (mm)	δ_f (mm)	δ_R (mm)	τ (MPa)	τ_m (MPa)	Desvio padrão	Coef. de variação (%)
LCR-1	24,33	0,581	0,191	0,390	2,68	2,26	0,46	20,5
LCR-2	24,18	0,823	0,175	0,648	2,44			
LCR-3	25,74	0,813	0,193	0,620	2,74			
LCR-4	22,36	0,626	0,163	0,463	2,27			
LCR-5	15,83	0,316	0,114	0,202	1,59			
LCR-6	18,26	0,535	0,130	0,405	1,83			
LCR-M-1	27,69	0,330	0,137	0,193	3,28	3,30	-	-
LCR-M-2	27,07	0,262	0,133	0,129	3,31			
LVR-1	28,82	0,474	0,326	0,148	3,15	3,04	0,12	4,0
LVR-2	26,95	0,513	0,326	0,187	2,91			
LVR-3	29,11	0,469	0,326	0,143	3,06			

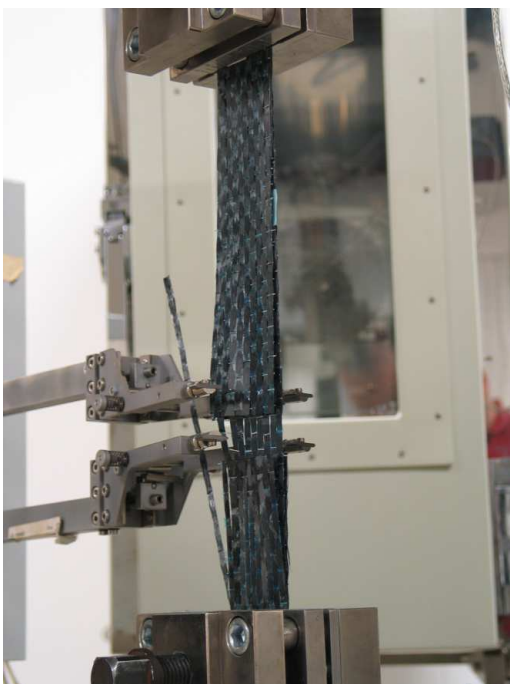
Tabela 6.1: Resultados dos ensaios de caracterização da ligação FRP-resina



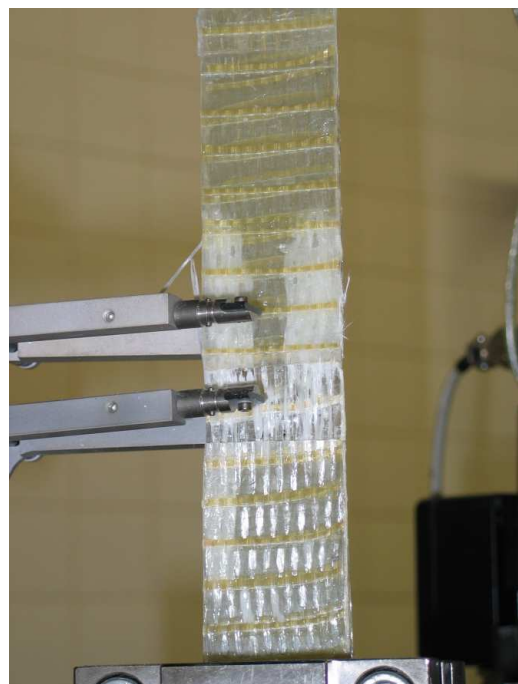
LCR-M: i) Rotura vertical



LCR-M: ii) Descolamento da interface

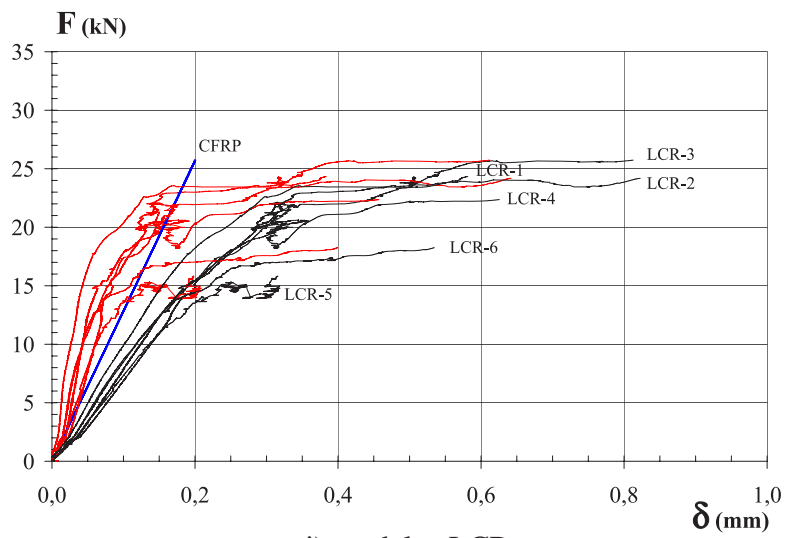


LCR: Descolamento da interface

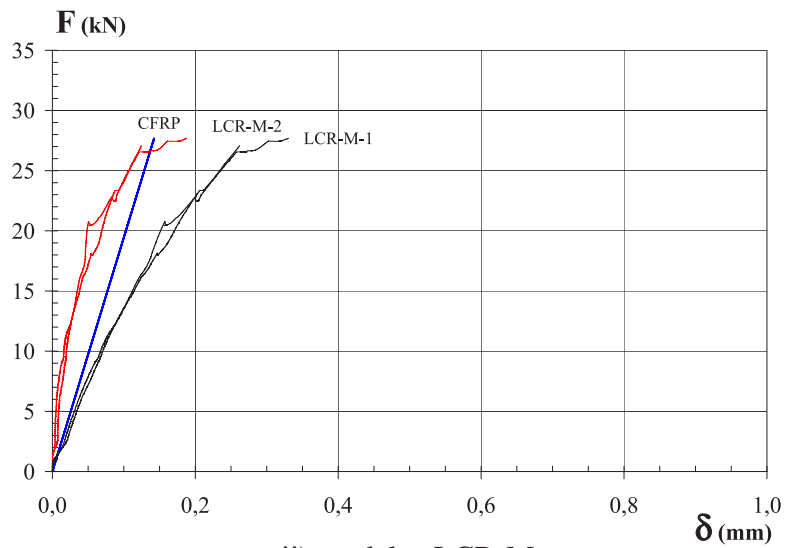


LVR: Plastificação da resina e rotura das fibras

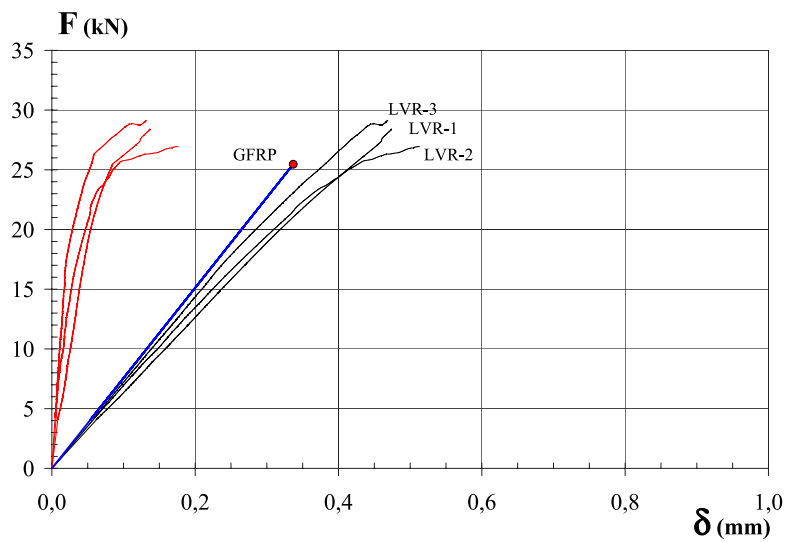
Figura 6.2: Pormenores da rotura dos modelos LCR-M, LCR e LVR



i) modelos LCR



ii) modelos LCR-M



iii) modelos LVR

Figura 6.3: Diagrama força-deslocamento dos modelos LCR, LCR-M e LVR

A análise dos resultados dos ensaios permite constatar que a ligação LCR regista um valor médio da tensão de aderência de 2,26 MPa, valor que é inferior ao da ligação LCR-M em 32% e ao da ligação LVR em 26%. Na ligação LVR a rotura deu-se sempre após uma plastificação visível da resina com posterior rotura pelas fibras, enquanto nas ligações LCR e LCR-M a rotura ocorreu na interface, conforme se pode observar na Figura 6.2. Verifica-se, assim, que a ligação LCR poderia melhorar substancialmente o seu comportamento com uma resina com melhores características ou com um procedimento de aplicação semelhante ao da ligação LVR em que a fibra é totalmente impregnada em resina.

Por fim, refira-se que os ensaios da ligação FRP-Resina, tal como aqui foram descritos, em conjunto com ensaios de arrancamento por tracção ("pull off") poderão revelar-se muito úteis em obra para controlo de qualidade da aplicação. Os ensaios realizados nessas condições deverão ser comparados com valores característicos de referência para o tipo de aplicação em questão.

Capítulo 7

Betão Polimérico

Um betão polimérico é o resultado da mistura de um agregado mineral com uma resina polimérica que substitui o ligante água/cimento Portland do betão convencional. Comparativamente com este, o betão polimérico apresenta diversas vantagens, tais como: elevada resistência mecânica, melhor resistência química e baixa permeabilidade [25].

O desenvolvimento do betão polimérico começou nas décadas de 50 e de 60 do século XX com a utilização de diversos polímeros em diferentes composições e por diferentes métodos [27]. Algumas das primeiras aplicações estavam relacionadas com a produção de mármore sintéticos e desde então, o seu desenvolvimento tem-se feito com relativa rapidez, em especial na área dos componentes pré-fabricados, devido à sua boa trabalhabilidade, baixa temperatura de cura e desenvolvimento de resistências elevadas em pouco tempo [25].

O incremento da utilização dos betões ou argamassas poliméricas tem estado condicionado pelo seu elevado custo. Por esse facto a sua aplicação em estruturas tem-se limitado à reparação ou reforço de zonas localizadas dos elementos estruturais. O futuro parece apontar para a sua utilização em novas soluções estruturais com base em materiais compósitos [30].

As resinas utilizadas são normalmente epoxídicas ou de poliéster. As resinas epoxídicas são mais caras, apresentando normalmente melhores características mecânicas. Na Universidade da Califórnia está a ser desenvolvido um projecto de uma ponte quase integralmente construída com materiais compósitos [30] em que os betões poliméricos de resinas epoxídicas são utilizados nas zonas de ancoragem e os de resinas poliéster na ligação das guardas ao tabuleiro.

No Departamento de Engenharia Civil da Universidade Nova de Lisboa (UNL) tem-se vindo a desenvolver trabalho de investigação nesta área, em colaboração com o INEGI, em especial no estudo da durabilidade dos betões poliméricos [25, 29]. Por outro lado, e na sequência de outros trabalhos de investigação, considerou-se interessante, dadas as elevadas características resistentes dos betões poliméricos, o estudo e desenvolvimento de uma solução de reforço utilizando este material.

No decurso de um ensaio às acções cíclicas do pilar P10 de betão armado reforçado com CFRP foi necessário proceder ao reforço da respectiva sapata nas duas faces

laterais numa espessura de 10 cm, tendo-se utilizado para o efeito Icosit KC 220/60 com cargas, um produto comercializado pela Sika. O produto utilizado é uma resina epoxídica à qual se adicionaram cargas com uma dosagem estipulada, formando assim, um betão polimérico.

Em seguida faz-se uma descrição das resinas, dos inertes, da composição e das características mecânicas do betão polimérico aplicado no reforço do pilar P2R, cuja composição foi desenvolvida pelo INEGI [24], e que se passará a designar pelas letras A ou B. De igual forma se apresentam os dados referentes à resina da *Sika* (*Icosit KC220/60*) que se designará pela letra C. O betão polimérico formado pela resina *Icosit KC220/60* e pelas cargas será referido pela letra D.

7.1 Formulação e preparação dos betões poliméricos utilizados

Na formulação A desenvolvida pelo INEGI [24] foi utilizada a seguinte composição em peso: 20% de resina epoxídica - EPOSIL 551 e 80% de areia de fundição (SP55), em que a resina e o endurecedor foram misturados na proporção 2:1 em peso. Em termos químicos a resina epoxídica (EPOSIL 551) é baseada num diglicidil éter de bisfenol A e o endurecedor numa amina alifática.

Na formulação D proposta pela Sika [28] foi utilizada a seguinte composição: 33,3% de resina epoxídica Icosit KC 220/60 e 66,6% de cargas. As cargas utilizadas foram misturadas numa proporção de 25% em peso de cada uma das seguintes quatro cargas: carga 2, carga 123, carga 128 e carga 148. A resina (componente A) e o endurecedor (componente B) foram misturados na proporção 45:55 em peso.

Nas Tabelas 7.1, 7.2 e 7.3 seguintes apresentam-se as características das resinas e das areias fornecidas pelos fabricantes.

Características das Resinas	Unidades	<i>Eposil 551</i>	<i>Icosit KC 220/60</i>
Dureza	Shore D	85	–
Peso específico	kg/l	1,18	1,36
Tg (TMA)	°C	54	–
HDT	°C	34	–
Tempo de gel	Min	27	60
Resistência à compressão	MPa	–	120
Resistência à tracção	MPa	35-45	–
Resistência à flexão	MPa	65-75	35
Mód. de Elast. em flexão	GPa	2,0-2,4	4,0

Tabela 7.1: Características das resinas *Eposil 551* e *Icosit KC220/60*

Características da Areia	Unidades	Valores		
		Min.	Méd.	Máx.
Índice de finura	–	49	51,5	54
Diâmetro médio D50	mm	–	0,342	–
Área específica real	cm ² /g	100	125	150
Área específica teórica	cm ² /g	–	–	100
Argila (AFS) < 20 µm	(%)	–	–	0,2
Matéria orgânica	ppm	–	–	10
Carbonatos	(%)	–	–	10
PH	–	6,5	7	7,5

Tabela 7.2: Características da areia (SP55) utilizada na formulação A

Características das Cargas	Natureza	Granulometria aproximada (mm)	Massa Volúmica aparente (kg/l)
Carga 2	Areias	0,1 a 0,3	1,6
Carga 123	siliciosas,	0,3 a 0,8	
Carga 128	calibradas e	0,8 a 1,2	
Carga 148	secas	2,0 a 4,0	

Tabela 7.3: Características das cargas utilizadas na formulação D



Figura 7.1: Preparação e aplicação do betão polimérico no pilar P2R



Figura 7.2: Pormenores do pilar P2R antes e após o reforço

Apresentam-se na Figura 7.1 algumas imagens que ilustram a adição e a mistura da resina com as areias no processo de fabrico do betão polimérico A, bem como a sua aplicação no reforço do pilar P2R. Na Figura 7.5 é possível observar o pilar antes de ser reforçado, um pormenor da zona de intervenção e o aspecto final do pilar P2R após o reforço.

As Figuras 7.3 e 7.4 mostram algumas imagens com os materiais utilizados no processo de fabrico do betão polimérico D, com relevo para as diferentes cargas utilizadas. Apresenta-se na Figura 7.5 um pormenor da sapata do pilar P10 na zona de intervenção, antes, durante e após a aplicação do betão polimérico.



Figura 7.3: Materiais da Sika utilizados no reforço da sapata do pilar P10

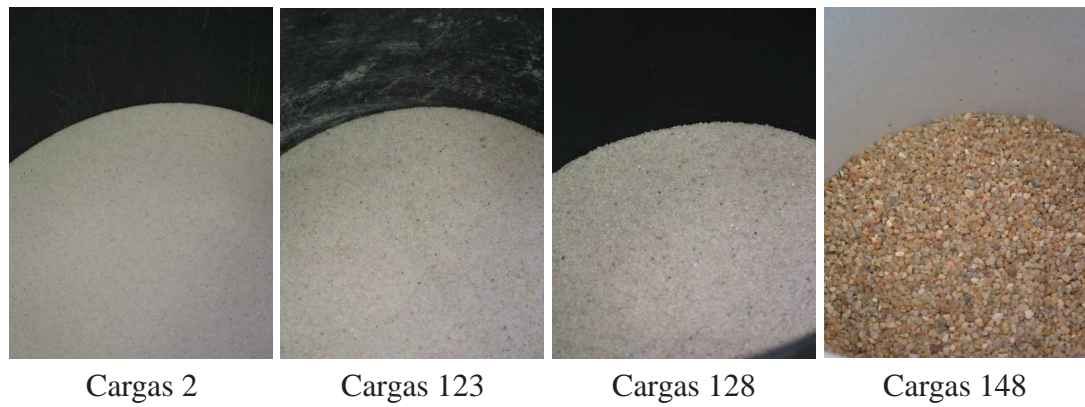


Figura 7.4: Pormenor das diversas granulometrias das areias utilizadas na composição do betão polimérico



Figura 7.5: Pormenores da sapata do pilar P10 antes, durante a betonagem e após o reforço

7.2 Caracterização mecânica dos betões poliméricos utilizados

Na altura do fabrico dos betões poliméricos prepararam-se seis provetes de controlo com $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ (Figura 7.6) para determinar as características mecânicas destes materiais. Realizaram-se ensaios para determinação da resistência e avaliação do comportamento à tracção por flexão, resistência à compressão e módulo de elasticidade. Além dos ensaios monotónicos realizaram-se igualmente alguns ensaios cíclicos.

A série A, com três, e a série B, com dois provetes, correspondem a duas amassaduras diferentes de betão polimérico da formulação A (INEGI). A série C é constituída por seis provetes de resina *Icosit KC220/60* da *Sika* e a série D por seis provetes de betão polimérico da formulação D (*Sika*).

Assim, dispunha-se à partida de dezassete provetes que foram ensaiados à flexão. Como a rotura neste tipo de ensaio dá-se a meio do provete, é possível aproveitar as duas metades daí resultantes para efectuar ensaios de compressão. Deste modo realizaram-se posteriormente dezassete ensaios de compressão axial monotónica (três na série A, dois na série B e seis em cada uma das séries C e D) e complementarmente onze ensaios de compressão axial cíclica (dois na série B e três em cada uma das séries A, C e D).



Figura 7.6: Bateria de moldes com os provetes das séries C e D e prensa do LabDEC utilizada no ensaio dos provetes

Mostra-se na Figura 7.6 uma bateria de moldes com os provetes das séries C e D, bem como a prensa do LabDEC utilizada no ensaio dos provetes. Na Figura 7.7



Figura 7.7: Equipamento e pormenor do ensaio de tracção por flexão do provete A1

apresenta-se o equipamento e um pormenor do ensaio de tracção por flexão do provete A1.

Os modos de rotura obtidos no ensaio dos provetes dos diferentes tipos de betão polimérico (A, B, C e D) podem ser observados na Figura 7.8.

7.2.1 Ensaio de tracção por flexão

Na Figura 7.9 apresentam-se os diagramas tensão de rotura à tracção versus deslocamento (flecha) obtidos do ensaio à flexão dos provetes de betão polimérico. Na Tabela 7.4 indicam-se os respectivos valores para cada provete da força de rotura (F), tensão de rotura à tracção (f_{pct}) e deslocamento (d) obtidos dos ensaios, bem como os correspondentes valores médios.

Constata-se da análise da Figura 7.9 e da Tabela 7.4 que, em termos de resistência à tracção, os provetes das séries A, B e D apresentam valores médios semelhantes: 26,3; 27,2 e 26,8 MPa, enquanto a série C, correspondendo a provetes só de resina *Icosit KC220/60*, apresenta um valor médio superior (36,2 MPa), o que significa que os provetes de betão polimérico perderam em média 26,2% de resistência à tracção relativamente aos provetes só de resina. Contudo, é de realçar o facto de os provetes de betão polimérico perderem em resistência mas ganharem em rigidez, como se pode observar na Figura 7.9.

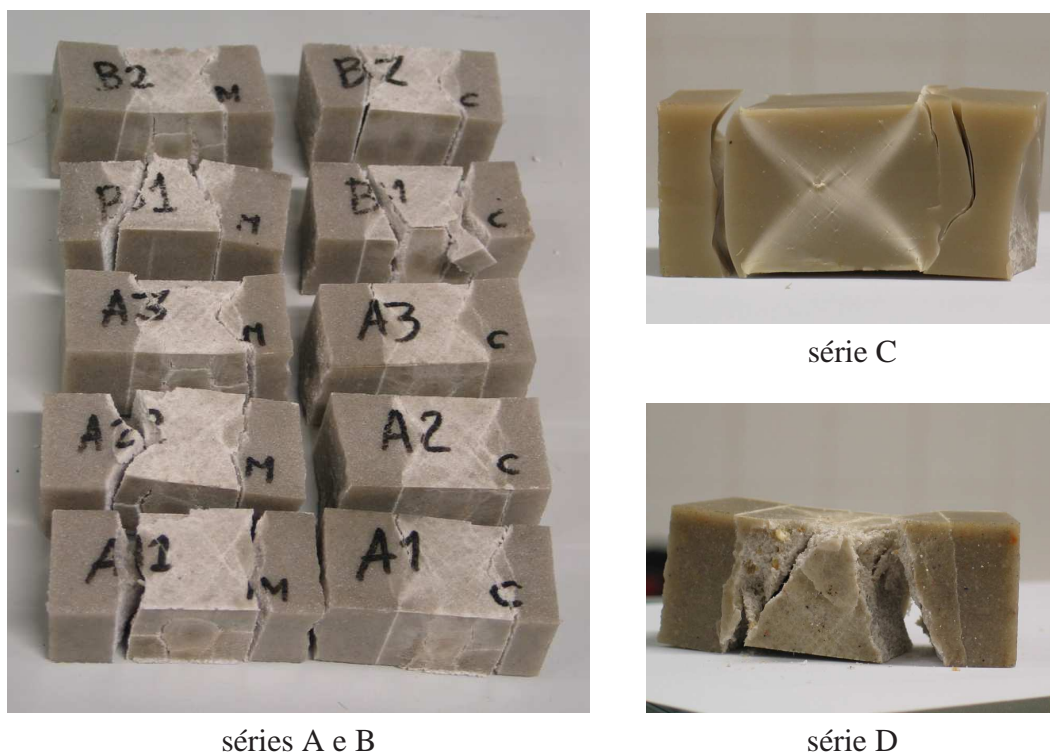


Figura 7.8: Pormenores da rotura dos provetes após os ensaios

7.2.2 Ensaios de compressão monotónica

Na Figura 7.10 apresentam-se os diagramas tensão-deformação dos ensaios de compressão monotónica e na Tabela 7.5 indicam-se os valores para cada provete da tensão de rotura à compressão (f_{pc}), extensão na rotura (ε_{pc}), 85% da tensão de compressão após a rotura ($f_{pc,0.85}$), a respectiva extensão ($\varepsilon_{pc,0.85}$) e o módulo de elasticidade (E).

Em termos de andamento dos diagramas tensão-deformação constata-se que as séries A e B têm um andamento do mesmo tipo, com a série B a registar uma tensão de rotura superior. Quanto à série C, os seus valores da tensão de rotura são superiores aos da série A, mas inferiores aos da série D. No entanto, e apesar de ser bastante mais deformável do que as outras séries, a série C consegue manter a capacidade resistente acima dos 90 MPa para valores da deformação por vezes superiores a 16% (excepto C1-m).

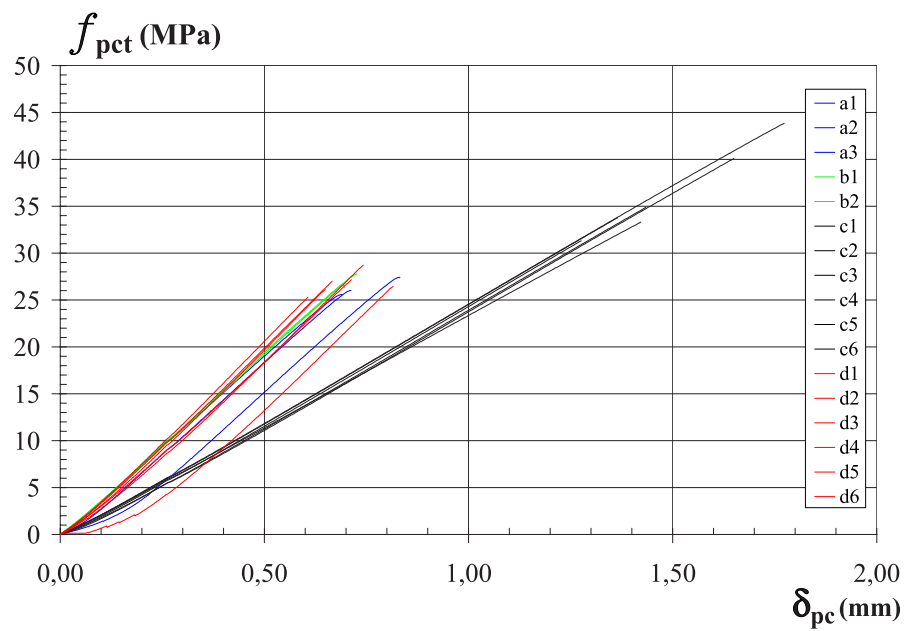
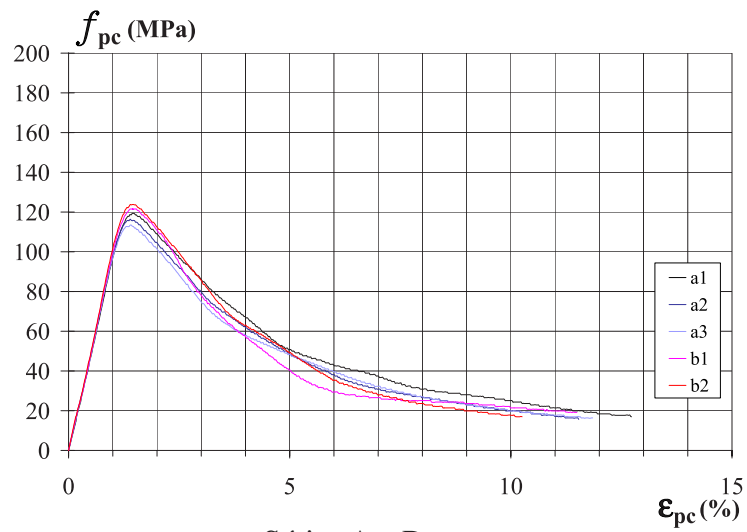


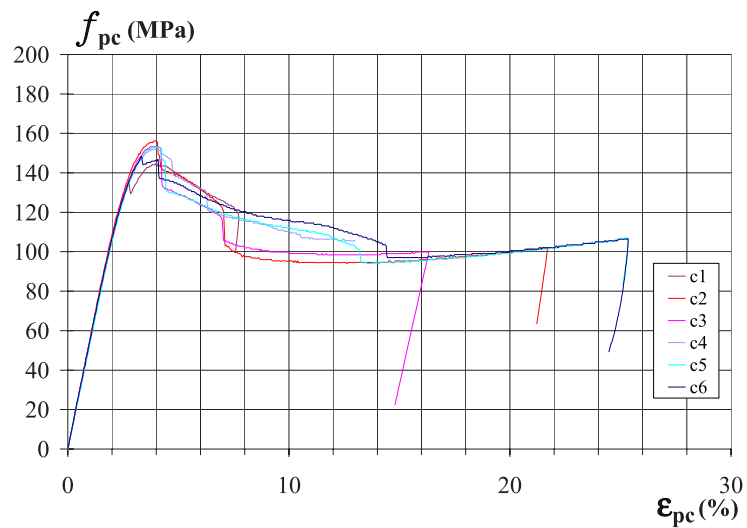
Figura 7.9: Diagramas tensão de ruptura à tracção versus deslocamento (flecha) obtidos do ensaio à flexão dos provetes de betão polimérico

Provete	F (N)	F_m (N)	f_{pct} (MPa)	f_{pctm} (MPa)	d (mm)	d_m (mm)
A1	11105		26,0		0,71	
A2	11702	11243	27,4	26,3	0,83	0,74
A3	10921		25,6		0,69	
B1	11854		27,8		0,73	
B2	11324	11589	26,5	27,2	0,70	0,72
C1	14213		33,3		1,42	
C2	14881		34,9		1,43	
C3	13360	15445	31,3	36,2	1,28	1,49
C4	17107		40,1		1,65	
C5	18706		43,8		1,77	
C6	14405		33,8		1,36	
D1	11588		27,2		0,71	
D2	12255		28,7		0,74	
D3	11523	11429	27,0	26,8	0,67	0,70
D4	11275		26,4		0,82	
D5	10794		25,3		0,61	
D6	11137		26,1		0,65	

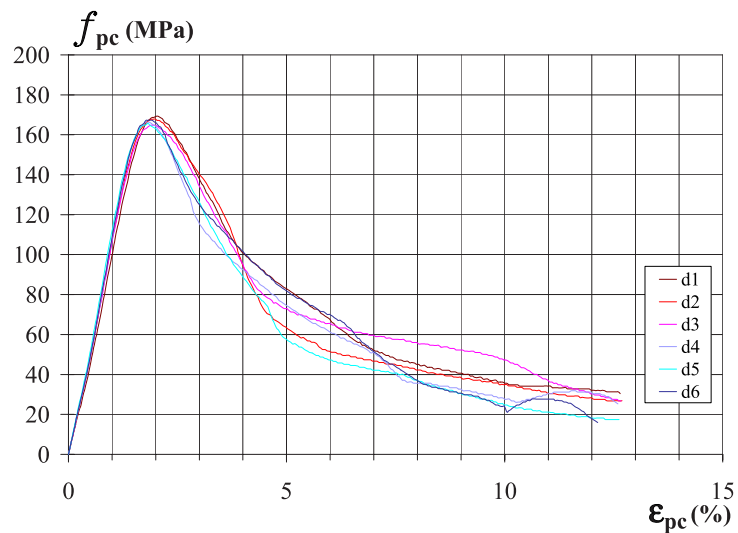
Tabela 7.4: Valores dos ensaios de flexão-tracção de betão polimérico



Séries A e B



Série C



Série D

Figura 7.10: Diagramas tensão-deformação dos ensaios de compressão monotónica

Provete	f_{pc} (MPa)	ε_{pc} (%)	$f_{pc,0.85}$ (MPa)	$\varepsilon_{pc,0.85}$ (%)	E (GPa)
A1-m	119,3	1,46	101,6	2,30	9,3
A2-m	116,4	1,40	98,8	2,21	9,3
A3-m	113,4	1,41	96,6	2,18	9,2
B1-m	121,6	1,43	103,3	2,26	9,2
B2-m	123,8	1,44	105,3	2,27	9,4
C1-m	145,0	4,01	123,6	7,38	5,5
C2-m	156,1	3,95	132,7	5,94	5,5
C3-m	153,2	3,92	130,5	4,78	5,6
C4-m	152,0	3,90	129,9	6,28	5,4
C5-m	153,3	4,01	130,6	4,53	5,3
C6-m	148,2	3,34	126,2	6,51	5,5
D1-m	169,3	2,01	144,3	2,85	9,2
D2-m	167,9	1,99	143,0	2,92	9,8
D3-m	164,8	1,93	140,1	2,87	9,8
D4-m	166,3	1,81	140,1	2,55	9,9
D5-m	165,7	1,82	140,1	2,65	10,4
D6-m	167,3	1,87	141,7	2,56	10,0

Tabela 7.5: Valores dos ensaios monotónicos de betão polimérico

7.2.3 Ensaios de compressão cíclica

Não se encontrou nenhum procedimento de ensaio para este tipo de testes, pelo que se admitiu para as séries A, C e D um critério que passa primeiro pela determinação do valor do deslocamento na rotura (Δ_{pc0}) de um provete sujeito a cargas monotónicas, sendo os ciclos de carga e descarga aplicados função deste deslocamento Δ_{pc0} . A velocidade de ensaio em todos os provetes ensaiados com cargas cíclicas foi de 10 $\mu\text{m/s}$.

Assim, começa-se por realizar um primeiro ciclo a $0,25\Delta_{pc0}$ seguido de outros a 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 1,75; 2; 2,5; 3 até $n \Delta_{pc0}$, terminando-se o ensaio após a rotura, assim que se alcance um valor da extensão na ordem dos 10% nos provetes das séries A e D ou dos 30% na série C.

Na série B aplicou-se em cada um dos provetes uma história de carga diferente. Assim, no provete B1-c começou-se por aplicar, um deslocamento correspondente a cerca de 60% da carga de rotura, seguido de conjuntos de dez ciclos variando inicialmente $\pm 10\%$ do deslocamento correspondente à carga de rotura, passando depois para $\pm 20\%$, para $\pm 30\%$ e finalmente para $\pm 40\%$, levando no final o provete à rotura e terminando o ensaio assim que se alcançou um valor da extensão na ordem dos 10%. Na Figura 7.11 pode-se observar que existiu diminuição de carga para ciclos de deslocamentos constantes e que, apesar da história de carga diferente até à rotura, o provete revelou no ramo descendente do diagrama tensão-deformação um

comportamento idêntico ao do provete correspondente ensaiado monotonicamente.

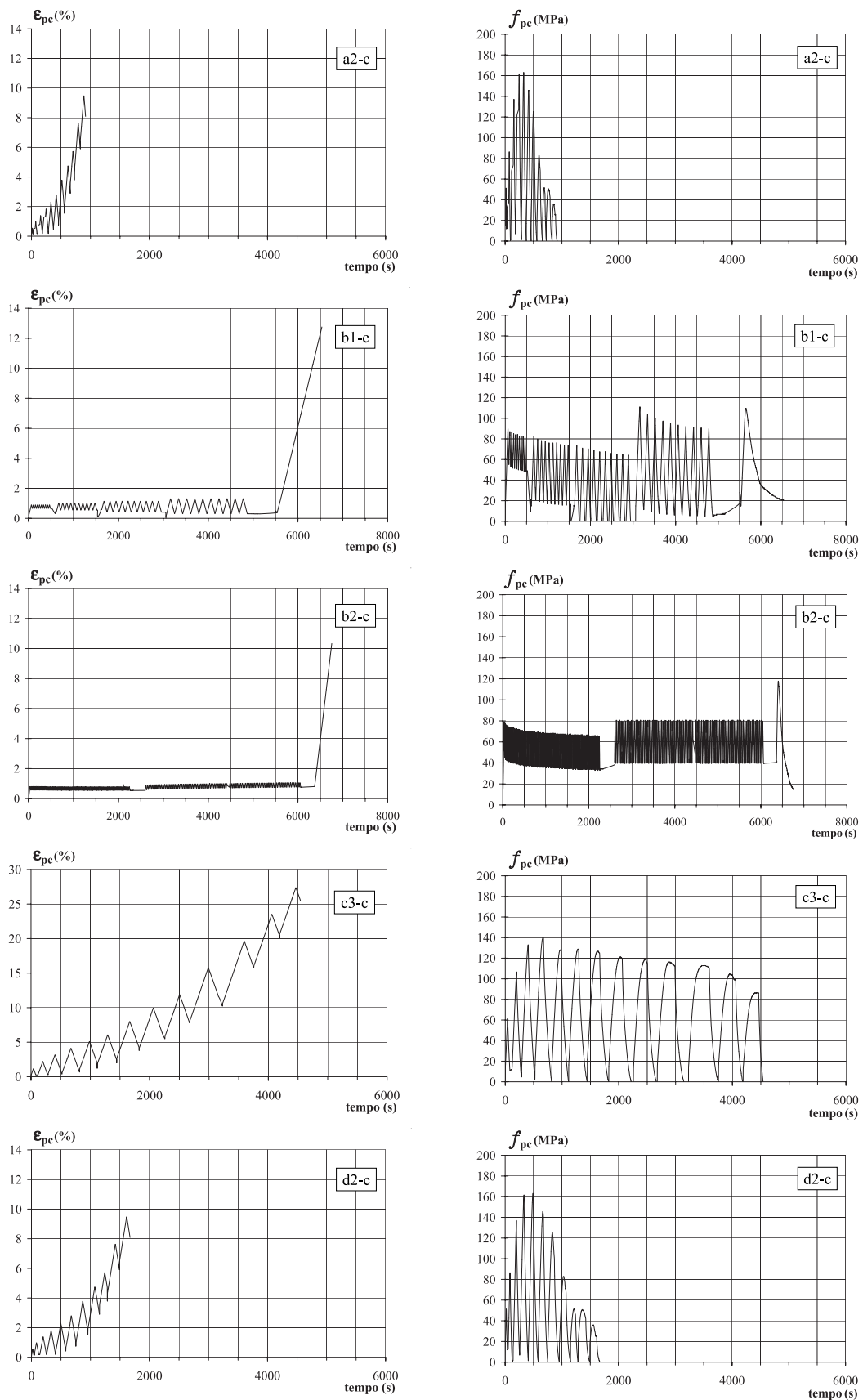
No provete B2-c aplicou-se inicialmente um deslocamento correspondente a cerca de 50% da carga de rotura alcançada no provete ensaiado com cargas monotónicas, seguida de cem ciclos com $\pm 15\%$ do deslocamento correspondente à carga de rotura. Observa-se na Figura 7.11 que existiu diminuição de carga para ciclos de deslocamentos constantes. Partindo de um valor de 50% da carga de rotura aplicou-se, posteriormente, ao mesmo provete, cem ciclos de carga de $\pm 15\%$ da carga de rotura, tendo-se constatado um aumento de deslocamento para ciclos de carga constantes. No final, levou-se o provete à rotura, terminando o ensaio assim que se alcançou um valor da extensão na ordem dos 10%. Pode-se observar, na Figura 7.13 que, apesar da história de carga diferente até à rotura e tal como aconteceu com o provete B1-c, o B2-c apresentou no ramo descendente do diagrama tensão-deformação um comportamento idêntico ao do provete ensaiado monotonicamente.

A título de exemplo mostra-se na Figura 7.11 os diagramas com a história de extensões ou de tensões a que os provetes A2-c, B1-c, B2-c, C3-c e D2-c foram sujeitos.

Nas Figuras 7.12 a 7.15 apresentam-se os diagramas tensão-deformação dos ensaios cíclicos realizados nas séries A, B, C e D em conjunto com os ensaios monotónicos dos provetes correspondentes. Na Tabela 7.6 indicam-se os valores para cada provete da tensão de rotura à compressão (f_{pc}), extensão na rotura (ε_{pc}), 85% da tensão de compressão após a rotura ($f_{pc,0.85}$), a respectiva extensão ($\varepsilon_{pc,0.85}$) e o módulo de elasticidade (E).

Da observação das Figuras 7.12 e 7.15 constata-se que os provetes da série D apresentam um melhor comportamento às acções cíclicas, com a envolvente cíclica do diagrama tensão-deformação a revelar um comportamento quase idêntico ao do ensaio monotónico, ao contrário dos provetes da série A, em que é visível a degradação provocada nos provetes pelas acções cíclicas.

A explicação para esta situação poderá estar na curva granulométrica de cada uma das formulações e não no comportamento das resinas. Enquanto na série A é apenas utilizada uma areia com um diâmetro médio de 0,342 mm, na série D são utilizadas quatro cargas diferentes cujos diâmetros variam entre os 0,1 mm e os 4,0 mm, o que poderá corresponder a um menor índice de vazios e, portanto, a um melhor comportamento, admitindo uma viscosidade idêntica em ambas as resinas. Contudo, só com novos ensaios em que ambos os betões poliméricos tenham a mesma curva granulométrica e ensaios da resina *Eposil 551* se poderão tirar conclusões definitivas.



Extensão-tempo Tensão-tempo

Figura 7.11: História de extensões ou tensões aplicadas (A2, B1, B2, C3 e D2)

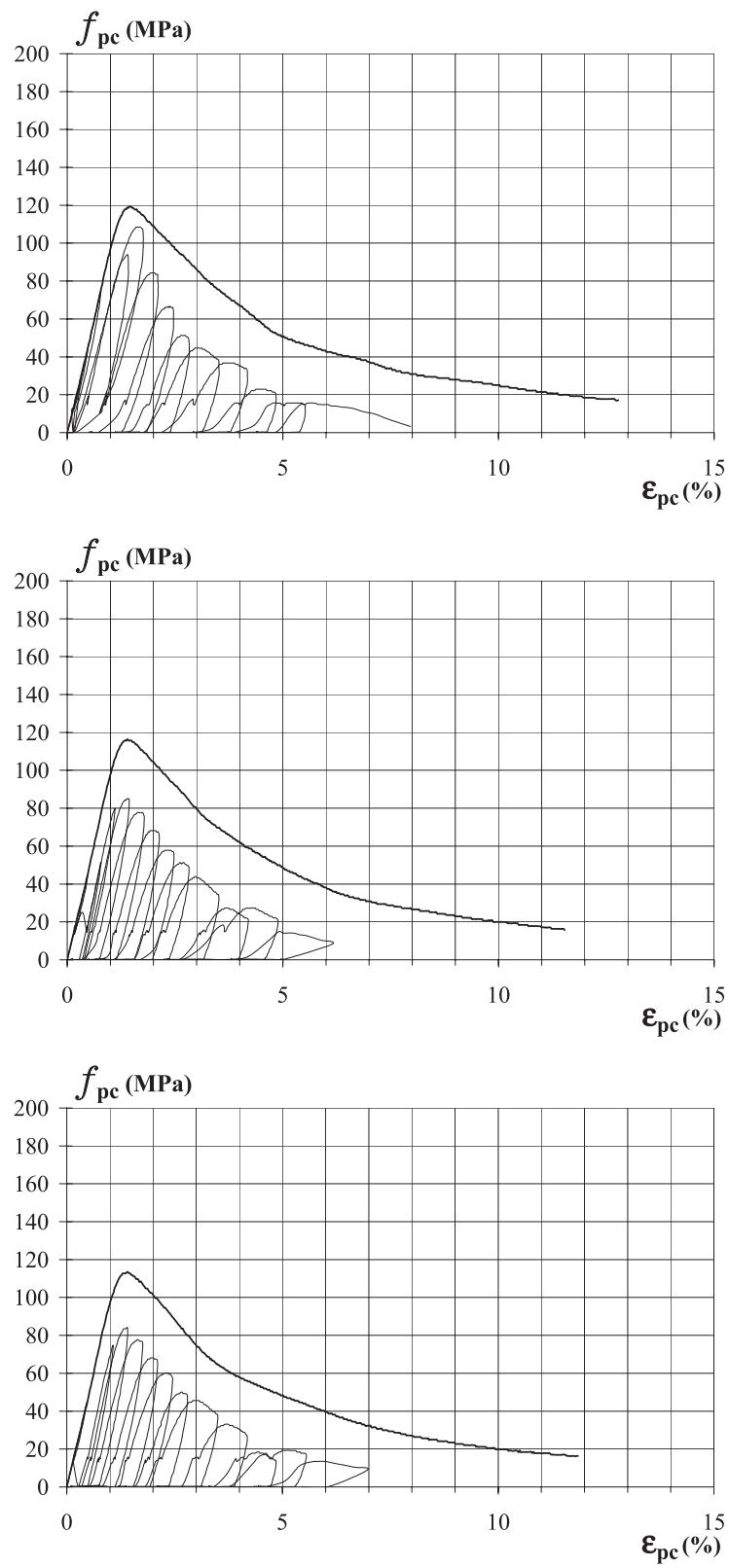


Figura 7.12: Diagramas tensão-deformação dos provetes A1, A2 e A3

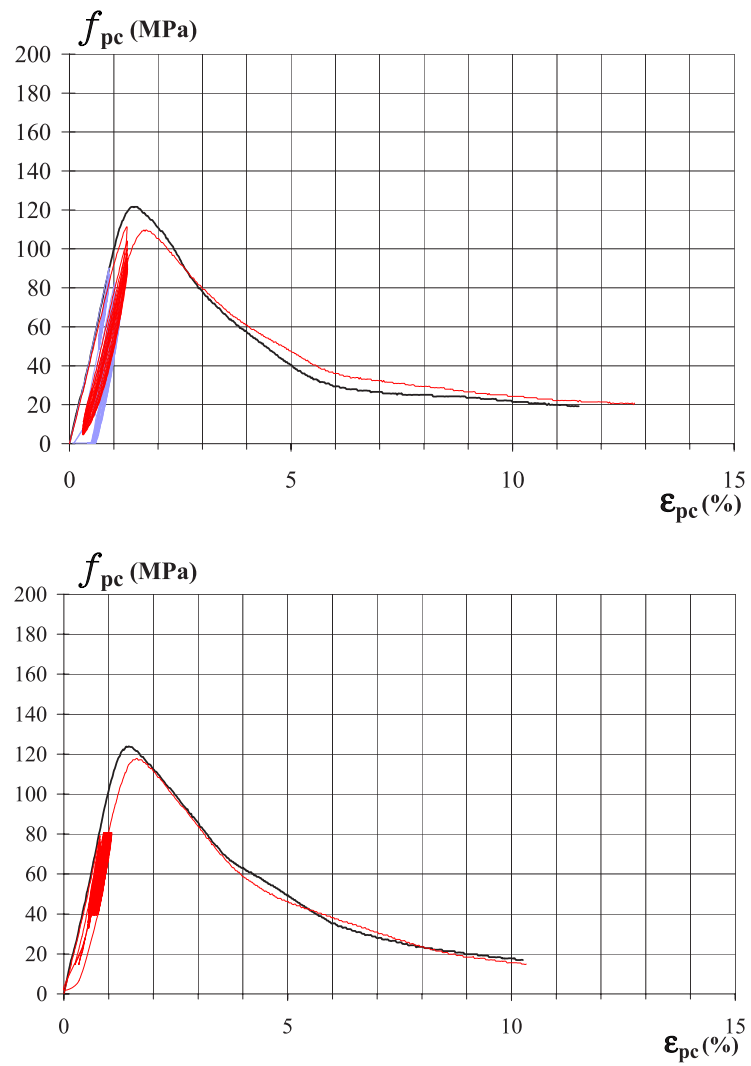


Figura 7.13: Diagramas tensão-deformação dos provetes B1 e B2

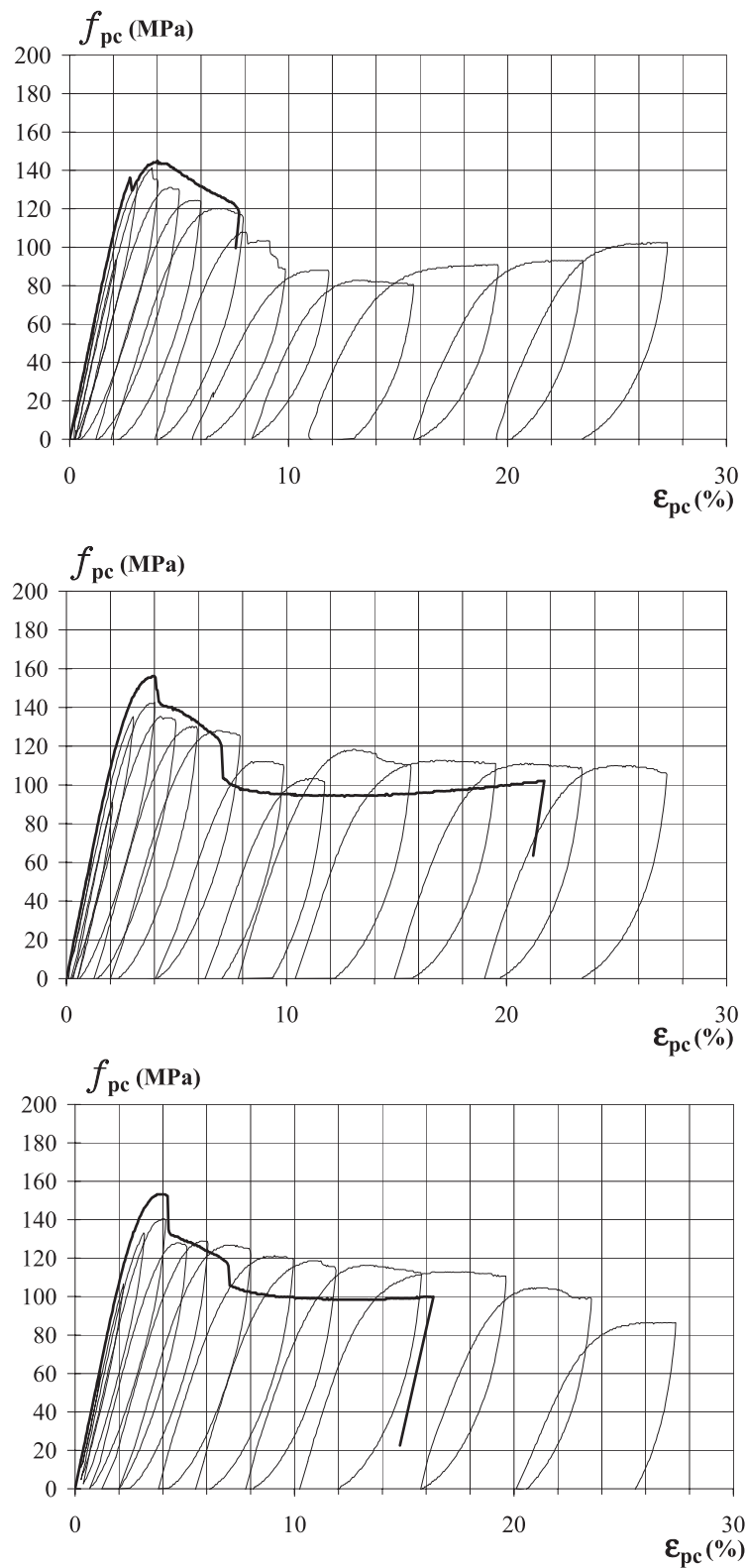


Figura 7.14: Diagramas tensão-deformação dos provetes C1, C2 e C3

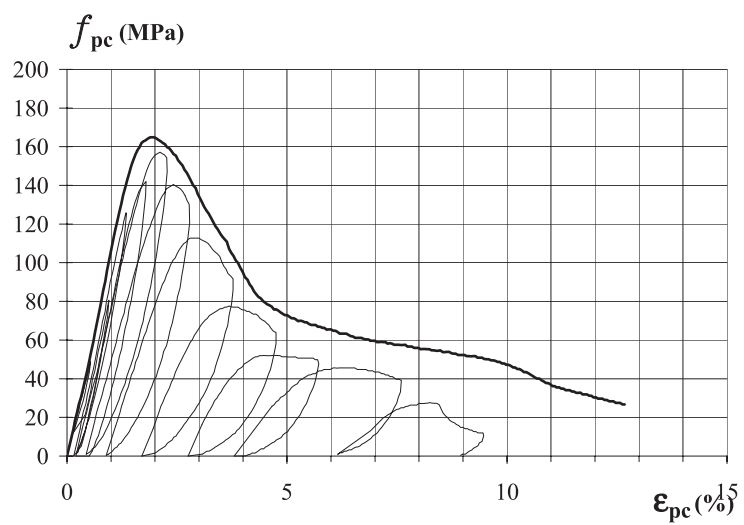
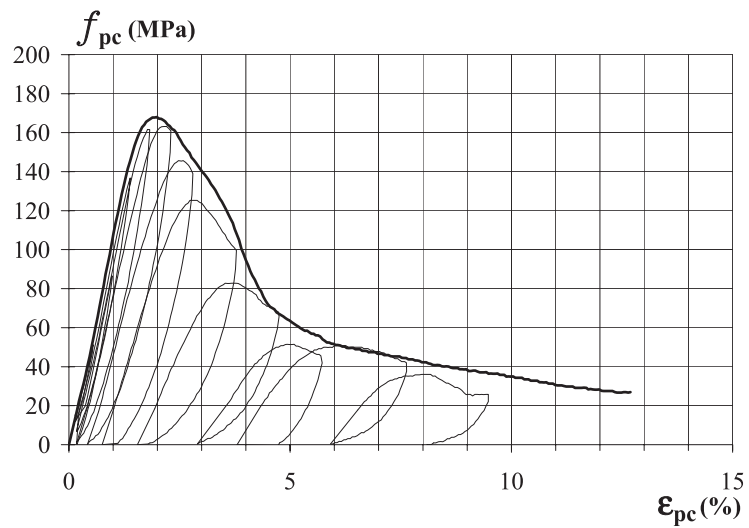
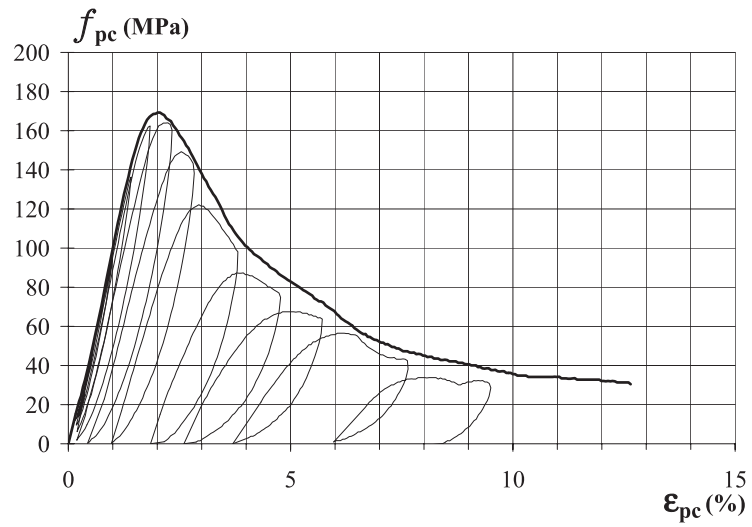


Figura 7.15: Diagramas tensão-deformação dos provetes D1, D2 e D3

Provete	f_{pc} (MPa)	ε_{pc} (%)	$f_{pc,0.85}$ (MPa)	$\varepsilon_{pc,0.85}$ (%)	E (GPa)
A1-c	108,4	1,64	91,6	1,75	9,3
A2-c	85,0	1,41	74,8	1,79	9,4
A3-c	84,2	1,40	72,6	1,76	9,6
B1-c	111,2	1,30	94,4	2,42	9,5
B2-c	117,9	1,72	100,3	2,40	9,0
C1-c	141,2	3,76	120,1	7,04	5,4
C2-c	142,7	3,80	125,1	7,90	5,5
C3-c	140,4	4,02	119,4	9,95	5,3
D1-c	164,0	2,24	138,2	2,83	9,5
D2-c	163,2	2,21	139,0	2,80	9,9
D3-c	157,1	2,12	134,5	2,69	9,5

Tabela 7.6: Valores dos ensaios cíclicos de betão polimérico

7.2.4 Análise dos resultados e conclusões da caracterização mecânica

Na Figura 7.16 é possível comparar em termos qualitativos o comportamento dos provetes de betão polimérico (a1 e d1) e da resina Icosit KC 220/60 (c4) com um provete de betão simples C25/30. Na Tabela 7.7 indicam-se os valores médios para cada série da tensão de rotura à compressão (f_{pcm}), extensão na rotura (ε_{pcm}), 85% da tensão de compressão após a rotura ($f_{pc,0.85m}$), a respectiva extensão ($\varepsilon_{pc,0.85m}$) e o módulo de elasticidade (E_m).

Da análise dos resultados verifica-se que a série D é a que apresenta melhores características, com valores superiores à série A, em 43,4% em termos de resistência à compressão, em 34,5% em termos da deformação na força máxima, em 22,4% na deformação para 85% da força máxima e em 6,5% em termos de módulo de elasticidade. Constatou-se que o betão polimérico (série D) tem um acréscimo de 7,5% de resistência em relação à resina que lhe serviu de base (série C), uma diminuição da deformação em cerca de 50% e um aumento do módulo de elasticidade em 78%.

Na Tabela 7.8 apresenta-se uma relação entre os valores médios dos ensaios monotónicos e cíclicos para cada série de ensaios realizada. Constatou-se que na série A os ensaios cíclicos provocam uma degradação da resistência em 20% e um aumento da extensão na rotura em 4%. Quanto à série B, apesar dos dados apresentados, não faz muito sentido a sua comparação com as restantes séries porque a história de carga foi substancialmente diferente. A série C evidencia uma degradação de resistência de 7% e um substancial incremento de 40% na deformação para 85% da força máxima, enquanto a série D regista apenas uma ligeira diminuição da resistência (3%) e um aumento de 15% da extensão na rotura.

Em resumo, poder-se-á concluir que o melhor comportamento do betão polimérico da série D à compressão monotónica se deve a uma resina com melhores características

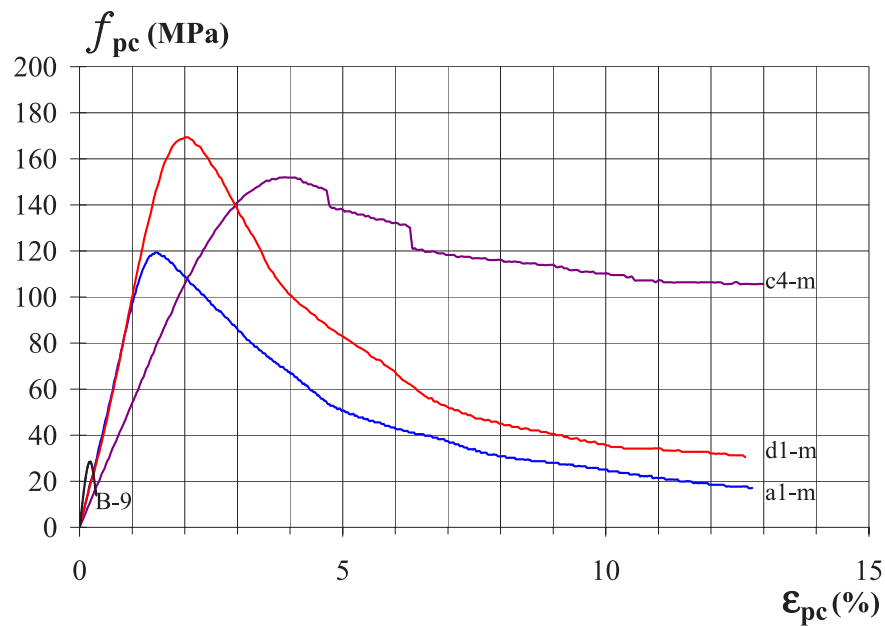


Figura 7.16: Comparação dos diagramas tensão-deformação de um provete de betão do tipo BB com os betões poliméricos das séries A, C e D

Série	f_{pcm} (MPa)	ε_{pcm} (%)	$f_{pc,0.85m}$ (MPa)	$\varepsilon_{pc,0.85m}$ (%)	E_m (GPa)	f_{pctm} (MPa)
A-m	116,4	1,42	99,0	2,23	9,2	26,3
B-m	122,7	1,44	104,3	2,26	9,3	27,2
C-m	151,3	3,86	128,9	5,90	5,5	36,2
D-m	166,9	1,91	141,5	2,73	9,8	26,8
A-c	92,5	1,48	79,7	1,76	9,4	26,3
B-c	114,5	1,51	97,4	2,41	9,2	27,2
C-c	141,4	3,86	121,5	8,29	5,4	36,2
D-c	161,4	2,19	137,3	2,77	9,6	26,8

Tabela 7.7: Valores médios dos ensaios monotónicos e cíclicos de betão polimérico

Série	f_{pcm}	ε_{pcm}	$f_{pc,0.85m}$	$\varepsilon_{pc,0.85m}$
A	-20%	+4%	-20%	-21%
B	-7%	+5%	-7%	+7%
C	-7%	0%	-6%	+40%
D	-3%	+15%	-3%	+2%

Tabela 7.8: Relação entre os valores médios dos ensaios monotónicos e cíclicos

resistentes, enquanto o seu comportamento às acções cíclicas se deve à sua curva granulométrica que permite produzir um betão com um menor índice de vazios e, portanto, um melhor comportamento resistente.

Referências Bibliográficas

- [1] ACI-440R. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. American Concrete Institute, July 2000.
- [2] ASTM-39-86. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Annual Book of ASTM Standards, 1993.
- [3] ASTM-469-87A. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, Annual Book of ASTM Standards, 1993.
- [4] ASTM-78-84. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), Annual Book of ASTM Standards, 1993.
- [5] ASTM-C496-90. Standard Test Method for Splitting Tensile Static Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Annual Book of ASTM Standards, 1993.
- [6] ASTM-D3039/D3039M. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, Annual Book of ASTM Standards, 1995.
- [7] BETTOR MBT PORTUGAL. *Sistema MBrace - Fichas Técnicas*, 2001.
- [8] EUROCÓDIGO-2. *Projecto de Estruturas de Betão - Parte 1.1: Regras Gerais e Regras para Edifícios*, vol. I e II. CEN ENV-1992-1-1, 1998.
- [9] FIB-BULLETIN-1. *Structural Concrete. Textbook on Behaviour, Design and Performance. Updated Knowledge of the CEB/FIB Model Code 1990. Introduction - Design Process - Materials*, vol. 1. 1999.
- [10] FIB-BULLETIN-14. *Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures*. 2001.
- [11] FYFE CO. LLC. *Quality Control Manual for the Tyfo Fibrwrap System*, December 1999.
- [12] FYFE CO. LLC. *Tyfo-S Saturant Epoxy. Technical Information and Application Advice*, April 2000.

- [13] FYFE CO. LLC. *Tyfo-SEH-51 Composite Using Tyfo-S Saturant Epoxy. Technical Information and Application Advice*, May 2002.
- [14] GIBSON, R. F. *Principles of Composite Material Mechanics*. McGraw-Hill, 1994.
- [15] HYER, M. W. *Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials*. McGraw-Hill, 1998.
- [16] ISO-527-1:1993(E). *Plastics - Determination of Tensile Properties*, 1993.
- [17] LNEC-E226-1968. *Betão - Ensaio de Compressão. Especificação LNEC*, Dezembro, 1968.
- [18] MITSUBISHI CHEMICAL CORPORATION. *Replark System Design Guideline*.
- [19] MITSUBISHI CHEMICAL CORPORATION. *Replark Technical Datasheet*, December 1996.
- [20] MITSUBISHI CHEMICAL CORPORATION. *Replark System - Material Properties & Standard Application Procedures*, November 1997.
- [21] MODEL CODE-90. *Design Code*. CEB-FIB, Bulletin d'Information 213/214, Lausanne, 1993.
- [22] NP-EN10002-1. *Materiais Metálicos - Ensaio de Tracção*. Comité Europeu de Normalização, 1990.
- [23] NP-ENV206. *Betão - Comportamento, Produção, Colocação e Critérios de Conformidade, Norma Portuguesa*. IPQ, Outubro 1993.
- [24] RIBEIRO, M. C. S., TAVARES, C. M. L., AND FERREIRA, A. J. M. Chemical Resistance of Epoxy and Polyester Polymer Concrete to Acids and Salts. *Journal of Polymer Engineering, Freund Publishing House* 24, 1 (2002), 27–44.
- [25] RIBEIRO, M. C. S., TAVARES, C. M. L., FERREIRA, A. J. M., PAULO, A. M. C., AND SILVA, M. G. Mechanical Behaviour of Polymer Concrete. In *CCC2001, Composites in Construction* (Porto, October 2001), FEUP, A.A.Balkema.
- [26] RIPPER, T. *Historial da Tecnologia de Reforço com FRP, Caracterização dos Materiais Compósitos e Conceitos para Cálculo de Reforço*. Seminário MBrace - Reforço de estruturas com fibras de carbono, Outubro 1999.
- [27] SANTIAGO, M. O., MARÍN, C. G., FERNÁNDEZ, J. R., AND MARTINEZ, J. A. L. Historical Record and Building Applications of Polymeric Mortars. In *CCC2001, Composites in Construction* (Porto, October 2001), FEUP, A.A.Balkema.

-
- [28] SIKA. *Prontuário. Catálogo de Fichas Técnicas*, 5^a ed., 2002.
- [29] SILVA, M. G. Influence of Environmental Caging on Properties of Polymeric Mortars. *Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE*. Aceite para publicação.
- [30] ZHAO, L., KARBHARI, V., SIEBLE, F., BROSTROM, M., ROVER, H., AND BURGUENO, R. Design and Evaluation of Modular Bridge Systems using FRP Composite Materials. In *FRPRCS-5, Fibre-reinforced plastics for Reinforced Concrete Structures* (Cambridge, July 2001), Thomas Telford.