

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Faculdade de Ciências e Tecnologia

Departamento de Engenharia Civil

**DURABILIDADE DE ARGAMASSAS POLIMÉRICAS DE  
AGREGADOS LEVES**

Alexandre Patrão Neves Alves

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil,  
na especialidade de Estruturas e Geotecnia

Orientador científico: Professor Doutor Carlos Chastre Rodrigues

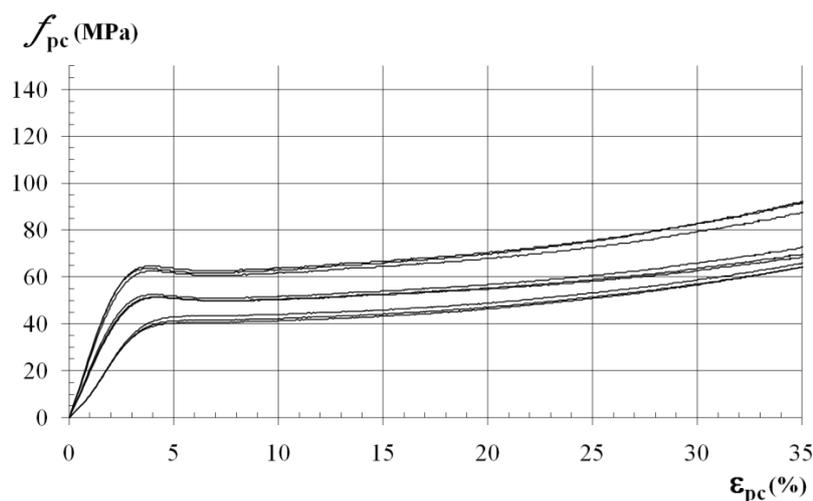
Lisboa

2010



Departamento de Engenharia Civil

# DURABILIDADE DE ARGAMASSAS POLIMÉRICAS DE AGREGADOS LEVES



Alexandre Patrão Neves Alves

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, na especialidade de Estruturas e Geotecnia pela Universidade Nova de Lisboa

Orientador: Carlos Chastre Rodrigues

**Julho 2010**



## AGRADECIMENTOS

Quero aqui expressar profundamente o meu afectuoso reconhecimento a todos quantos prestaram esclarecimentos, apresentaram sugestões e conselhos e me ajudaram na realização desta dissertação.

Ao Professor Carlos Chastre Rodrigues que orientou e acompanhou o desenvolvimento deste trabalho, por todo o apoio prestado, pela sua acção vigorante, crítica e encorajadora, sempre manifestados de forma amigável e pela sua ajuda indispensável nos ensaios laboratoriais.

Aos Engenheiros Rui Marreiros, Ana Rita Reis e Ana Brás por toda a ajuda e pela disponibilidade que demonstraram para prestar esclarecimentos e informações.

Ao Senhores José Gaspar e Jorge Silvério por toda a ajuda no laboratório, nomeadamente o corte das peças do tabuleiro e o corte dos provetes.

À Fabricor, pela disponibilidade demonstrada e pelo fornecimento do pó de cortiça.

À Sika, mais concretamente à Engenheira Patrícia Lopes pelo fornecimento da resina ICOSIT KC 220/60.

Aos meus pais, quero mostrar a minha gratidão pela paciência, ensinamentos e apoio que demonstraram em toda a minha vida nos anos de conclusão do curso.



---

## RESUMO

O objectivo deste estudo é avaliar a durabilidade de argamassas poliméricas com agregados leves face a diversos agentes ambientais. Para este propósito, investigou-se o efeito de ciclos de molhagem-secagem em ambiente salino, com a molhagem em água salgada e secagem no interior de uma câmara climática. Além disso, avaliou-se o efeito de ciclos de molhagem-secagem em ambientes ácidos, utilizando-se ácido sulfúrico e ácido fórmico.

Analisa-se neste trabalho o comportamento de quatro tipos de argamassas poliméricas à base de resinas epoxídicas numa concentração de 85% em peso, e de agregados leves de dois tipos (pó de cortiça ou de borracha) numa concentração de 15%.

Os ciclos de molhagem-secagem em ambiente salino consistiram em submeter os provetes a imersão de 2 horas em água salgada, 20 horas de secagem a 50 °C e arrefecimento à temperatura ambiente durante 2 horas, perfazendo assim um ciclo com a duração de 24 horas. Os provetes foram retirados da câmara climática aos 60 ciclos e aos 120 ciclos nos quais foram avaliadas a perda de massa e de resistência.

A investigação acerca do efeito dos ciclos de molhagem-secagem em ambiente com ácido sulfúrico, consistiu na imersão e secagem, durante 5 ciclos, de provetes em várias concentrações de ácido sulfúrico (5, 10, 15, 20 e 30%) durante 7 dias, seguida da secagem numa estufa durante 7 dias, sendo posteriormente pesados com a finalidade de avaliar a sua perda de massa.

O efeito dos ciclos de molhagem-secagem em ácido fórmico foi avaliado imergindo os provetes numa solução de ácido fórmico com uma concentração de 10% efectuando o mesmo número de ciclos que foram realizados nos ensaios com ácido sulfúrico. No final de cada ciclo os provetes foram pesados e após 5º ciclo estes foram também ensaiados à compressão monotónica.



## ABSTRACT

The aim of this study is to evaluate the durability of polymeric mortars with lightweight aggregate facing several environmental agents. For this purpose, it was investigated the effect of wet-drying cycles in saline environments, with the soaking in salt water and drying inside a climatic chamber. Furthermore, it was evaluated the effect of wet-drying cycles in acidic environments, using sulfuric and formic acid solutions.

In this study it is analyzed the behavior of four types of epoxy resin polymer mortars with a concentration of 85% by weight, with two types of filler (cork powder and rubber powder) with a concentration of 15%.

The wet-dry cycles in saline environment consisted on immersing the specimens in salt water for 20 hours, followed by 20 hours of drying at 50°C and cooling at room temperature for 2 hours, this consisting on a 24 hour cycle. Specimens were removed at 60 cycles and at 120 cycles in which the loss of weight and strength were evaluated.

The research of the effect of sulfuric acid immersion consisted on immersing the specimens on different types of sulfuric acid solutions (5, 10, 15, 20 and 30%) for 7 days and then to be dried in an oven for 7 days. After each cycle the specimens were weighted to evaluate its mass loss. Five cycles of immersion-drying were made.

The effects of wet-dry cycles in formic acid were evaluated by immersing the specimens in a formic acid solution with a concentration of 10% and were made the same number of that have been made for the immersion in sulfuric acid study. At the end of each cycle the specimens were weighted and at the 5<sup>th</sup> cycle, compression tests were also made.



## **PALAVRAS CHAVE**

Resina  
Epoxy  
Betão polimérico  
Argamassa polimérica  
Agregados Leves  
Ácido Fórmico  
Ácido Sulfúrico  
Água salgada  
Análise experimental  
Durabilidade  
Borracha  
Cortiça

## **KEY WORDS**

Resin  
Epoxy  
Polymer concrete  
Polymer mortar  
Lightweight aggregates  
Formic acid  
Sulfuric acid  
Salt water  
Experimental analysis  
Durability  
Rubber  
Cork



---

## ÍNDICE

<b>Capítulo 1- INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	1
1.2 FUNDO HISTÓRICO .....	2
1.3 CARACTERÍSTICAS DO BETÃO POLIMÉRICO .....	4
1.4 APLICAÇÕES DO BETÃO POLIMÉRICO.....	5
1.5 LIMITAÇÕES.....	7
1.6 MATERIAIS .....	8
1.6.1 POLÍMERO.....	8
1.6.1.1 Resina Epoxy.....	10
1.6.2 AGREGADOS LEVES .....	15
1.7 OBJECTIVOS E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	17
<b>Capítulo 2 - MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO</b> .....	19
2.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE DURABILIDADE, DESEMPENHO, VIDA ÚTIL E MANUTENÇÃO DAS ESTRUTURAS DE BETÃO .....	19
2.2 MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE BETÃO .....	22
2.2.1 DETERIORAÇÃO PROVOCADA PELA ÁGUA DO MAR.....	22
2.2.2 EXPOSIÇÃO AOS SAIS .....	23
2.2.3 EXPOSIÇÃO AOS ÁCIDOS .....	23
2.3 FACTORES QUE AFECTAM A DEGRADAÇÃO DE POLÍMEROS.....	26
2.3.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	26
2.3.2 PESO MOLECULAR .....	27
2.3.3 TAMANHO DAS MOLÉCULAS.....	27
2.3.4 ADITIVOS .....	27
2.3.5 LIGAÇÕES QUÍMICAS.....	27
2.3.6 CONDIÇÕES AMBIENTAIS .....	27

---

**Capítulo 3- COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS POLIMÉRICAS FACE A  
ACÇÕES MECÂNICAS E AGENTES AMBIENTAIS** 29

3.1 COMPORTAMENTO MECÂNICO .....	29
3.2 EFEITO DA PRESENÇA DE AGREGADOS LEVES NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	39
3.3 COMPORTAMENTO FACE A AGENTES AMBIENTAIS E QUÍMICOS .....	46
3.3.1 RESISTÊNCIA À TEMPERATURA, NEVOEIRO SALINO, HUMIDADE .....	46
3.3.2 RESISTÊNCIA QUÍMICA .....	69
3.4 CONCLUSÕES .....	79

**Capítulo 4- CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS** 83

4.1 RESINA EPOXÍDICA .....	83
4.2 CORTIÇA .....	85
4.2.1 ESTRUTURA E COMPOSIÇÃO DA CORTIÇA .....	85
4.2.1.1 Estrutura Macroscópica.....	85
4.2.1.2 Estrutura Microscópica.....	86
4.2.1.3 Composição Química.....	87
4.2.2 PROPRIEDADES DA CORTIÇA.....	88
4.2.3 PÓ DE CORTIÇA.....	89
4.2.4 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA .....	90
4.3 BORRACHA.....	93
4.3.1 PROCESSO DE TRATAMENTO DOS GRANULADOS DE BORRACHA .....	95
4.3.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA .....	98

---

<b>Capítulo 5 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b>	101
5.1 PREPARAÇÃO DOS MODELOS .....	101
5.2 ENSAIOS DE DURABILIDADE.....	102
5.2.1 CICLOS DE MOLHAGEM-SECAGEM EM AMBIENTE SALINO.....	102
5.2.2 CICLOS DE MOLHAGEM-SECAGEM EM AMBIENTE ÁCIDO.....	106
5.2.2.1 Ácido Sulfúrico.....	106
5.2.2.2 Ácido Fórmico.....	107
5.3 ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA .....	108
5.3.1 RESISTÊNCIA À TRACÇÃO POR FLEXÃO .....	108
5.3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MONOTÓNICA .....	110
<b>Capítulo 6 – ANÁLISE DE RESULTADOS</b>	113
6.1 ENVELHECIMENTO ARTIFICIAL ATRAVÉS DE CICLOS DE MOLHAGEM-SECAGEM EM AMBIENTE SALINO.....	114
6.1.1 AVALIAÇÃO DA PERDA DE MASSA .....	114
6.1.2 ENSAIO À TRACÇÃO POR FLEXÃO.....	116
6.1.3 ENSAIO À COMPRESSÃO MONOTÓNICA.....	126
6.2 ENVELHECIMENTO ARTIFICIAL DEVIDO A CICLOS DE MOLHAGEM- SECAGEM EM AMBIENTES ÁCIDOS .....	140
6.2.1 ÁCIDO SULFÚRICO .....	140
6.2.1.1 Avaliação da perda de massa.....	141
6.2.1.2 Alterações na cor e na textura.....	144
6.2.2 ÁCIDO FÓRMICO.....	145
6.2.2.1 Avaliação da perda de massa.....	146
6.2.2.2 Ensaio à compressão monotónica.....	148
6.2.2.3 Alterações na cor e na textura.....	156
6.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	140

---

<b>Capítulo 7– CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b>	1611
7.1 CONCLUSÕES.....	1611
7.1.1 MATERIAIS.....	1622
7.1.2 CICLOS DE MOLHAGEM-SECAGEM EM AMBIENTE SALINO.....	1633
7.1.3 DEGRADAÇÃO DEVIDO AO EFEITO DOS ÁCIDOS .....	1666
7.1.3.1 Ácido Sulfúrico.....	179
7.1.3.2 Ácido Fórmico.....	181
7.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	169
<b>REFERÊNCIAS BILIOGRÁFICAS</b>	171

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Constituintes de uma resina epoxídica .....	10
Figura 1.2 – Resina epoxídica vista no microscópio electrónico .....	11
Figura 1.3 – Estrutura química de uma resina epoxídica típica .....	13
Figura 1.4 – Panteão de Roma.....	16
Figura 2.1 - As bactérias nos sistemas de esgotos produzem ácido sulfúrico que ataca o betão .....	26
Figura 3.1 – Diagramas tensão-deformação dos ensaios de tracção por flexão dos provetes de resina e de betão polimérico .....	30
Figura 3.2 – Diagramas de tensão-deformação dos ensaios de compressão monotónica das séries E e C .....	31
Figura 3.3 – Diagramas de tensão-deformação dos ensaios de compressão monotónica das séries A, B e D.....	31
Figura 3.4 - Curvas específicas de fluência para o betão polimérico. ....	33
Figura 3.5 - Aspecto final duma viga de betão polimérico reforçada com varão de pultrusão (Plástico reforçado com fibra de vidro). ....	35
Figura 3.6 – Resultados dos ensaios de fadiga. ....	37
Figura 3.7 – Efeito do tipo de resina e concentração de cinza volante na resistência à compressão axial.....	38
Figura 3.8 – Alguns exemplos de provetes cilindricos e prismáticos produzidos de betão polimérico modificado com cortiça. ....	41
Figura 3.9 – Resistência à compressão e à flexão de ambas as séries de formulações de argamassa polimérica em função da quantidade de cortiça .....	41
Figura 3.10 – Módulo de elasticidade previsto e experimental de ambas as séries de formulações de argamassa polimérica em função da quantidade de cortiça. ....	42
Figura 3.11 – Efeito da cinza volante no tempo de cura das misturas 1 2 4 (o) e 1 3 6 (□). ....	43
Figura 3.12 – Efeito da cinza volante na resistência à flexão das misturas 1 2 4 (o) e 1 3 6 (□).....	47
Figura 3.13 – Efeito da cinza volante na absorção de água das misturas 1 2 4 (o) e 1 3 6 (□) .....	44
Figura 3.14 – Coeficientes de difusão gravimétrica para diferentes quantidades de borracha.....	46

---

Figura 3.15 – Temperatura de Aveiro durante o ano de estudo. ....	47
Figura 3.16 - Briquete de argamassa polimérica durante o teste de tracção. ....	48
Figura 3.17 – Variação da resistência á Flexão e Compressão com o tempo. ....	49
Figura 3.18 – Curvas de perda de massa (%) para ambas as argamassas após saturação: (a) água salgada; e (b) agua destilada. ....	51
Figura 3.19 - Efeito dos ciclos de humidade na resistência das argamassas (a) flexão; e (b) compressão.....	51
Figura 3.20 - Flexão última – Efeito dos ciclos de temperatura.....	52
Figura 3.21 – Efeito dos ciclos de nevoeiro salino na resistência à flexão última. ....	52
Figura 3.22 – Imagens SEM das argamassas de polyester e epoxídicas após os ciclos de nevoeiro salino.....	53
Figura 3.23 – Aspecto dos provetes de polyester e epoxy após a submissão à radiação solar.....	53
Figura 3.24 – Resistência à flexão das argamassas epoxídicas e de polyester em função da temperatura de condicionamento. ....	56
Figura 3.25 – Resistência à flexão das argamassas poliméricas de epoxy e polyester após regresso às condições iniciais, em função da temperatura. ....	57
Figura 3.26 – Resistência à flexão residual das argamassas poliméricos de epoxy e polyester após exposição aos 50 e 100 ciclos térmicos positivos (20 °C/100 °C).....	57
Figura 3.27 - – Resistência à flexão residual das argamassas poliméricas de epoxy e polyester após exposição aos 50 e 100 ciclos de gelo-degelo (ciclos molhados e ciclos secos).....	58
Figura 3.28 – Comparação da resistência à compressão aos 28 dias dos provetes de controlo e de betão polimérico com diferentes quocientes polímero - cimento.....	59
Figura 3.29 – Efeito da adição de polímero na taxa de carbonatação.....	60
Figura 3.30 - Efeito da adição de polímero na absorção de água.....	60
Figura 3.31 – Penetração de água a diferentes idades de teste para betão polimérico (LMC) e betão convencional (OPC).....	62
Figura 3.32 – Perda em resistência em resisistência à compressão após diferentes períodos de imersão para o betão polimérico (LMC) e betão convencional (OPC).....	63
Figura 3.33 – Formação de fendas radiais após a indentação Vickers de carga de 100 kg (25x).....	65
Figura 3.34 – Efeito da idade na resistência à flexão e à compressão. ....	66
Figura 3.35 – Efeito da temperatura na resistência à flexão e à compressão. ....	67

---

Figura 3.36 – Aspecto dos provetes de betão após a imersão de um dia numa solução 40% de ácido sulfúrico.....	71
Figura 3.37 – Efeito da concentração de ácido sulfúrico na perda de massa no betão convencional (PCC) e betão polimérico (SPC). .....	71
Figura 3.38 (a) – Resistência à compressão do betão polimérico curado numa solução salina 3% durante um ano a 24°C; (b) Resistência à compressão do betão polimérico curado por 7 dias em diferentes salinidades a 24 °C.....	72
Figura 3.39 – Testes químicos aos tijolos revestidos com resina epoxídica. ....	77
Figura 3.40 – Resistência à compressão do betão polimérico (AAS) e betão convencional (OPC) sujeitos ao ataque ácido. ....	78
Figura 3.41 – Diagrama esquemático do teste de corrosão acelerada. ....	79
Figura 3.42 – Máquina de teste para os testes de degradação acelerada.....	80
Figura 4.1 – Resinas epoxídicas MC-DUR1390K e ICOSIT KC 220/60.....	84
Figura 4.2 – Estrutura macroscópica da cortiça .....	86
Figura 4.3 – Estrutura microscópica da cortiça .....	87
Figura 4.4 – Aspecto do produto final do pó de cortiça.....	90
Figura 4.5 – Equipamento de peneiração mecânica .....	91
Figura 4.6 – Curva Granulométrica do pó de cortiça.....	92
Figura 4.7 - Fogo em pilha de pneus durante o Verão de 1999. Em Stanislaus, EUA. ..	94
Figura 4.8 - Processo-tipo de reciclagem criogénica.....	96
Figura 4.9 – Aspecto do produto final da borracha DC-8000 .....	97
Figura 4.10 – Curva Granulométrica do pó de borracha DC8000.....	99
Figura 5.1 – Alguns provetes depois da moldagem. ....	102
Figura 5.2 – Câmara climática de envelhecimento artificial.....	103
Figura 5.3 – Tabuleiros no interior da câmara climática. ....	104
Figura 5.4 – Pormenor dos provetes no interior dos tabuleiros de acrílico.....	104
Figura 5.5 – Pormenor do ciclo de imersão no interior da câmara climática.....	105
Figura 5.6 – Alguns provetes logo após serem retirados da estufa no final dos ciclos. ....	105
Figura 5.7 – Diagrama esquemático de um ciclo de degradação pela acção do ácido sulfúrico.....	106
Figura 5.8 – Exemplo de provetes imersos numa solução de ácido sulfúrico.....	107
Figura 5.9 – Provetes imersos na solução de ácido fórmico. ....	108
Figura 5.10 – Pormenores do ensaio à tracção por flexão. ....	109

---

Figura 5.11 – Pormenores do ensaio à compressão monotónica. ....	111
Figura 6.1 – Perda de massa (%) aos 60 e aos 120 ciclos. ....	116
Figura 6.2 - Pormenores de rotura à tracção por flexão dos provetes de resina MC-DUR 1390 VK: a) Provetes MC85DC e b) Provetes MC85A. ....	117
Figura 6.3 - Pormenores de rotura à tracção por flexão dos provetes de resina ICOSIT KC220/60: a) Provetes IC85DC e b) Provetes IC85A. ....	118
Figura 6.4 – Diagrama tensão deformação do ensaio à tracção por flexão aos 0, 60 e 120 ciclos dos provetes MC85DC. ....	119
Figura 6.5 – Diagrama tensão deformação do ensaio à tracção por flexão aos 0, 60 e 120 ciclos dos provetes MC85A. ....	119
Figura 6.6 – Diagrama tensão deformação do ensaio à tracção por flexão aos 0, 60 e 120 ciclos dos provetes IC85DC. ....	120
Figura 6.7 – Diagrama tensão deformação do ensaio à tracção por flexão aos 0, 60 e 120 ciclos dos provetes IC85A. ....	120
Figura 6.8 – Evolução da resistência à tracção por flexão ao longo dos ciclos estudados. ....	122
Figura 6.9 – Perda de resistência à tracção por flexão (%) aos 60 e aos 120 ciclos. ....	123
Figura 6.10 - Evolução da extensão na rotura de tracção por flexão ao longo dos ciclos estudados. ....	124
Figura 6.11 - Aumento da extensão na rotura de tracção por flexão (%) aos 60 e aos 120 ciclos. ....	125
Figura 6.12 – Evolução do módulo de elasticidade à tracção por flexão ao longo dos ciclos. ....	126
Figura 6.13 – Decréscimo do módulo de elasticidade à tracção por flexão (%) aos 60 e 120 ciclos. ....	127
Figura 6.14 – Pormenores de rotura à compressão monotónica a 35% de extensão dos provetes de resina MC-DUR 1390 VK: a) Provetes MC85DC e b) Provetes MC85A. ....	128
Figura 6.15 – Pormenores de rotura à compressão monotónica a 35% de extensão dos provetes de resina ICOSIT KC 220/60: a) Provetes IC85DC e b) Provetes IC85A. ....	128
Figura 6.16 – Diagrama tensão deformação do ensaio à compressão monotónica aos 0, 60 e 120 ciclos dos provetes MC85DC. ....	130
Figura 6.17 – Diagrama tensão deformação do ensaio à compressão monotónica aos 0, 60 e 120 ciclos dos provetes MC85A. ....	130
Figura 6.18 – Diagrama tensão deformação do ensaio à compressão monotónica aos 0, 60 e 120 ciclos dos provetes IC85DC. ....	131

---

Figura 6.19 – Diagrama tensão deformação do ensaio à compressão monotónica aos 0, 60 e 120 ciclos dos provetes IC85A. ....	131
Figura 6.20 – Evolução da tensão de cedência ao longo dos ciclos. ....	134
Figura 6.21 – Decréscimo da tensão de cedência (%) aos 60 e aos 120 ciclos ....	134
Figura 6.22 – Decréscimo de tensão a 35% de extensão (%) aos 60 e aos 120 ciclos. ....	136
Figura 6.23 – Evolução da tensão de cedência ao longo dos ciclos. ....	137
Figura 6.24 – Decréscimo de extensão de cedência (%) dos provetes MC85DC e MC85A aos 60 e aos 120 ciclos. ....	138
Figura 6.25 – Aumento de extensão de cedência (%) dos provetes IC85DC e IC85A aos 60 e aos 120 ciclos. ....	139
Figura 6.26 – Evolução do módulo de elasticidade à compressão ao longo dos ciclos. ....	140
Figura 6.27 – Decréscimo do módulo de elasticidade à compressão (%) aos 60 e 120 ciclos. ....	140
Figura 6.28 – Evolução da massa média ao longo dos ciclos nas várias concentrações de ácido sulfúrico. ....	143
Figura 6.29 – Evolução da perda de massa (%) ao longo dos ciclos. ....	143
Figura 6.30 – Foto comparativa dos provetes aos 0 e aos 5 ciclos de imersão em ácido sulfúrico. ....	145
Figura 6.31 – Evolução da massa ao longo dos ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico. ....	147
Figura 6.32 – Perda de massa (%) ao longo dos ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico. ....	147
Figura 6.33 – Diagrama tensão deformação do ensaio à compressão monotónica aos 0 e aos 5 ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico dos provetes MC85DC. ....	149
Figura 6.34 – Diagrama tensão deformação do ensaio à compressão monotónica aos 0 e aos 5 ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico dos provetes MC85A. ....	149
Figura 6.35 – Diagrama tensão deformação do ensaio à compressão monotónica aos 0 e aos 5 ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico dos provetes IC95DC. ....	153
Figura 6.36 – Diagrama tensão deformação do ensaio à compressão monotónica aos 0 e aos 5 ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico dos provetes IC95A. ....	153
Figura 6.37 – Foto comparativa entre os provetes MC85DC aos 0 e aos 5 ciclos .....	157
Figura 6.38 – Foto comparativa entre os provetes MC85A aos 0 e aos 5 ciclos. ....	158
Figura 6.39 – Foto comparativa entre os provetes IC95DC aos 0 e aos 5 ciclos .....	159
Figura 6.40 – Foto comparativa entre os provetes IC95A aos 0 e aos 5 ciclos. ....	160



---

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Resultados experimentais dos provetes condicionados e não condicionados .....	54
Tabela 3.2 – Perda de dimensões e de peso (%) em diferentes betões poliméricos (LMC) e convencionais.....	62
Tabela 3.3 – Perda de resistência à flexão e à compressão do betão polimérico após os ciclos de degradação. ....	75
Tabela 4.1 – Comparação das propriedades das resinas e do betão .....	84
Tabela 4.2 – Características das resinas MC-DUR 1390 VK e ICOSIT KC220/60. ....	85
Tabela 4.3 – Características físicas e mecânicas da cortiça. Adaptado de Dossier Info Cortiça_design Cork, for future, innovation and sustainability .....	89
Tabela 4.4 – Percentagens de material passado e retido em cada peneiro (Pó de Cortiça) .....	91
Tabela 4.5 – Parâmetros caracterizados na análise granulométrica do pó de cortiça. ....	93
Tabela 4.6 – Características da borracha DC8000.....	98
Tabela 4.7 – Percentagens de material passado e retido em cada peneiro (Pó de Borracha DC8000).....	98
Tabela 4.8 – Parâmetros caracterizados na análise granulométrica do pó de borracha DC8000. ....	111
Tabela 6.1 – Massa dos vários provetes aos 0, 60 e 120 ciclos.....	115
Tabela 6.2 – Tensão de rotura à tracção por flexão aos 0, 60 e 120 ciclos dos provetes MC85DC, MC85A, IC85DC e IC85A.....	121
Tabela 6.3 – Extensão na rotura à tracção por flexão aos 0, 60 e 120 ciclos dos provetes MC85DC, MC85A, IC85DC e IC85A.....	121
Tabela 6.4 – Módulo de elasticidade à tracção por flexão aos 0, 60 e 120 ciclos dos provetes MC85DC, MC85A, IC85DC e IC85A.....	122
Tabela 6.5 – Tensão de cedência aos 0, 60 e 120 ciclos dos provetes MC85DC, MC85A, IC85DC e IC85A. ....	132
Tabela 6.6 – Tensão a 35% de extensão 0, 60 e 120 ciclos dos provetes MC85DC, MC85A, IC85DC e IC85A.....	132
Tabela 6.7 – Extensão de cedência aos 0, 60 e 120 ciclos dos provetes MC85DC, MC85A, IC85DC e IC85A.....	133
Tabela 6.8 – Módulo de elasticidade aos 0, 60 e 120 ciclos dos provetes MC85DC, MC85A, IC85DC e IC85A.....	133

---

Tabela 6.9 – Evolução da massa (g) ao longo dos ciclos de imersão-secagem nas várias concentrações de ácido sulfúrico. ....	142
Tabela 6.10 – Perda de massa (%) ao longo dos ciclos de imersão-secagem nas várias concentrações de ácido sulfúrico. ....	142
Tabela 6.11 – Evolução da massa (g) ao longo dos ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico. ....	146
Tabela 6.12 – Perda de massa (g e %) ao longo dos ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico. ....	146
Tabela 6.13 – Tensão de cedência aos 0 e aos 5 ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico dos provetes MC85DC e MC85A.....	150
Tabela 6.14 – Extensão de cedência aos 0 e aos 5 ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico dos provetes MC85DC e MC85A.....	150
Tabela 6.15 – Tensão a 35% de extensão aos 0 e aos 5 ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico dos provetes MC85DC e MC85A. ....	150
Tabela 6.16 – Módulo de elasticidade aos 0 e aos 5 ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico dos provetes MC85DC e MC85A.....	151
Tabela 6.17 – Decréscimo de tensão de cedência, extensão de cedência e módulo de elasticidade dos provetes MC85DC e MC85A ao 5º ciclo de imersão-secagem em ácido fórmico. ....	151
Tabela 6.18 – Tensão de cedência aos 0 e aos 5 ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico dos provetes IC95DC e IC95A.....	154
Tabela 6.19 – Extensão de cedência aos 0 e aos 5 ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico dos provetes IC95DC e IC95A.....	154
Tabela 6.20 – Tensão a 25% de extensão aos 0 e aos 5 ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico dos provetes IC95DC e IC95A. ....	154
Tabela 6.21 – Módulo de elasticidade aos 0 e aos 5 ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico dos provetes IC95DC e IC65A.....	155
Tabela 6.22 – Decréscimo de tensão de cedência, extensão de cedência e módulo de elasticidade dos provetes IC95DC e IC95A ao 5º ciclo de imersão-secagem em ácido fórmico. ....	155

## NOTAÇÃO

$A_0$	- Área da secção inicial do corpo
$\delta_v$	- Flecha medida no provete
$\sigma_c$	- Tensão de compressão uniaxial
$\sigma_t$	- Tensão de tracção por flexão
B	- Largura do provete
d	- Espessura do provete
D	- Altura do provete
$E_i$	- Módulo de elasticidade do provete i
$E_m$	- Módulo de elasticidade médio
F	- Força de compressão aplicada
$f_{c,i}$	- Tensão de cedência à compressão do provete i
$f_{c,m}$	- Tensão de cedência à compressão
$f_{pct,i}$	- Tensão de rotura à tracção por flexão no provete i
$f_{pct,m}$	- Tensão de rotura à tracção por flexão média
$f_{r,i,35\%}$	-tensão de rotura à compressão a 35% de extensão do provete i
$f_{r,m,35\%}$	-tensão de rotura à compressão a 35% de extensão média
L	- Comprimento
m	- Massa
P	- Carga máxima obtida na vizinhança da rotura à tracção
$\varepsilon_{c,i}$	- Extensão na rotura à compressão no provete i
$\varepsilon_{c,m}$	- Extensão na rotura à compressão média
$\varepsilon_{pct,i}$	- Extensão na rotura à tracção no provete i
$\varepsilon_{pct,m}$	- Extensão na rotura à tracção média

## CLASSES DE MODELOS EXPERIMENTAIS

A	- Pó de cortiça
DC	- Pó de borracha DC-8000
IC	- Resina ICOSIT KC220/60

---

IC85A	- 85% de resina ICOSIT KC220/60 com 15% de pó de cortiça, em peso
IC85DC	- 85% de resina ICOSIT KC220/60 com 15% de pó de borracha, em peso
IC95A	- 95% de resina ICOSIT KC220/60 com 5% de pó de cortiça, em peso
IC95DC	- 95% de resina ICOSIT KC220/60 com 5% de pó de borracha, em peso
MC	- Resina MC-DUR 1390 VK
MC85A	- 85% de resina MC-DUR 1390 VK com 15% de pó de cortiça, em peso
MC85DC	- 85% de resina MC-DUR 1390 VK com 15% de pó de borracha, em peso

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Betão e argamassa realizados com cimento Portland, têm sido materiais de construção populares pelo mundo nos últimos 170 anos ou mais. No entanto, a argamassa e o betão realizado com cimento têm algumas desvantagens, tais como endurecimento lento, baixa resistência à tracção, retracção durante a cura, baixa resistência química. Para reduzir estas desvantagens, foram realizadas várias tentativas para usar polímeros. Uma destas tentativas é o betão ou argamassa poliméricos, que são realizados pela adição do betão ou argamassa comuns com aditivos poliméricos, tais como látexes, polímeros solúveis em água, resinas líquidas e monómeros. O betão polimérico apresenta assim uma maior resistência e endurecimento mais rápido que o betão convencional, assim como uma retracção controlada. Devido a razões económicas, o betão polimérico tem sido mais utilizado em trabalhos de reparação de edifícios e estruturas. O betão de resina, pode ser utilizado no fabrico de elementos estruturais e em revestimentos, pois apresenta uma excelente ligação ao betão convencional. O betão polimérico também tem sido utilizado em superfícies de pontes e em pavimentos, devido ao facto de poder ser utilizado em camadas finas, rápido tempo de cura, permeabilidade muito baixa e alta resistência a ataques químicos, ao contrário do betão convencional que, devido à sua alcalinidade, reage em ambientes ácidos.

A principal limitação deste material é o seu custo, por isso, uma das formas de minimizar esta limitação passa por adicionar à resina de elevado custo agregados leves. Na presente dissertação, utilizaram-se como agregados leves o pó de borracha, proveniente da reciclagem dos pneus, e o pó de cortiça, proveniente dos desperdícios da indústria da cortiça, numa proporção resina/agregado que permita manter as qualidades da resina com perda pouco significativa de resistência.

## **1.2 FUNDO HISTÓRICO**

O conceito de betão com polímeros não é novo e, em 1923, a sua primeira patente foi atribuída a Cresson[1]. Esta patente é referente a materiais de pavimentação com borrachas de látex naturais e, nesta patente, o cimento foi utilizado como filler. A primeira patente com o conceito presente de sistemas modificados de polímero de látex, foi publicado por Lefebure em 1924 [1]. Este aparenta ter sido o primeiro trabalhador que produziu betão de látex usando borrachas de látex naturais obtido através de um método de mistura. Esta patente é importante do ponto de vista histórico, visto que em 1925, uma ideia similar foi patenteada por Kirkpatrick [1].

Entre os anos 20 e 30, o conceito de cimento e polímero foi-se desenvolvendo, utilizando-se um látex de borracha natural. Em 1932 foi sugerido pela primeira vez a utilização de látex de borracha sintética, sendo que a primeira utilização de látex de acetado de polivinila em argamassa de cimento e polímero foi efectuada em 1933. Em síntese, a década de 30 representa o início da utilização em substituição do látex de borracha natural para o látex de borracha sintética ou de resina na argamassa de cimento e polímero. Por outras palavras, os anos 30 foram um ponto de viragem do uso de látexes como alternativas ao cimento (tanto borrachas naturais de látex como borrachas sintéticas ou resinas de látex). Nos anos 40, várias patentes de sistemas com látex sintéticos foram publicadas, tais como de policloropreno e látex de éster poliacrílico. Além disso, foram desenvolvidas argamassas modificadas com acetato de polivinila para aplicações práticas e tiveram nestes anos, na Inglaterra, utilização em convés de navios, em tabuleiros de pontes, em pisos anticorrosivos e como material adesivo. Ainda na Inglaterra, foram conduzidos estudos acerca da possibilidade de aplicação do

látex de borracha natural. O betão polimérico foi primeiramente a ser usado nos Estados Unidos da América no ano de 1950 para a produção de mármore sintética e no fabrico de painéis ou placas de guarnição nos finais de 1950. Em 1952, foram iniciados, nos Estados Unidos, os estudos sobre argamassa de cimento e polímeros e, a primeira aplicação prática foi na restauração da ponte de Cheyboygam, Michigan, em 1959 e que ainda hoje se apresenta em boas condições de utilização. Nos anos 60, houve um grande incremento nas aplicações de argamassa polimérica, tendo-se utilizado látex de estireno-butadieno, o éster poliacrílico e os ésteres polivinílicos e desde esta data as pesquisas e o desenvolvimento da argamassa polimérica têm tido considerável avanço em vários países, particularmente Estados Unidos, Japão e Inglaterra [1].

O uso de polímeros no betão foi desenvolvido nos Estados Unidos da América, tendo em vista três classificações gerais: Betão Impregnado de Polímero, Betão Polimérico Modificado e Betão Polimérico; o betão impregnado de polímero é um betão de cimento Portland hidratado, impregnado por um monómero e conseqüentemente polimerizado no local. A investigação em larga escala dos betões impregnados com polímeros começou nos Estados Unidos da América em 1966. O betão modificado com polímero é um material pré-misturado, no qual um monómero ou polímero é acrescentado ou adicionado resultando numa mistura de betão fresco, em líquido, sob a forma de pó ou fase dispersa e conseqüentemente submetido a cura, e ainda, se houver necessidade, polimerizado no sítio. O betão impregnado com polímero nunca foi utilizado em aplicações comerciais e hoje em dia é virtualmente inexistente. Conseqüentemente, surgiram um considerável número de publicações incluindo patentes, artigos e trabalhos. No final dos anos 60 foi desenvolvido um processo com o uso de resina poliéster insaturada, que recebeu o nome de “Estercrete”. Entre 1965 e 1973, foram patenteados vários sistemas baseados em resina epoxídica. Também nos anos 60 a metil celulose começou a ser utilizada como um polímero solúvel em água para modificar argamassa de assentamento de placas cerâmicas [2].

No 1º Congresso Internacional de Polímeros no Betão, que teve lugar em Inglaterra, no ano de 1975 foi publicada muita informação, mormente artigos técnicos no que concerne aos betões poliméricos. A seguir, outros Congressos tiveram lugar na Áustria e no Texas, em 1978; Koryama, Japão (1981); Darm-Stadt, Alemanha (1984); Brighthon,

Inglaterra (1987) e República Popular da China (1990). O 7º Congresso Internacional de Polímeros no betão foi conduzido e organizado na Rússia em Setembro de 1992. Todos os procedimentos publicados incluem artigos sobre diversos aspectos estruturais do betão polimérico. As propriedades de fadiga, impacto, abrasão e flamabilidade são objecto de discussão, onde se descreve simultaneamente a utilização dos betões poliméricos nos Estados Unidos da América, Rússia, Índia, Japão, Polónia, Alemanha, Inglaterra e África do Sul. Nos anos 70, foi realizado um desenvolvimento considerável em argamassa e betões poliméricos e, nos anos 80 este material tornou-se dominante na indústria da construção. O betão polimérico foi utilizado como material de reparação de estruturas em betão de cimento Portland nas estradas principais e pontes. A Administração Federal dos Estados Unidos para o Desenvolvimento das Vias Rodoviárias e o Departamento de Energia assumiram a investigação de todos estes materiais durante a década de 70, e no ano de 1980 foi incluído o betão polimérico [2].

Em 1985, apresentou-se um trabalho sobre a utilização de polímeros de acetato de polivinila e de poliacetato de vinila-etileno (EVA) para modificação de argamassas modificadas com látex de estireno-butadieno. Em 1986 foram efectuadas experiências com látex acrílico, verificando propriedades semelhantes às do betão de cimento e látex estireno-butadieno, utilizado como revestimento superficial para betões que buscam grande durabilidade, impermeabilidade e flexibilidade e que tem sido o polímero mais utilizado actualmente.

### **1.3 CARACTERÍSTICAS DO BETÃO POLIMÉRICO**

O betão polimérico é um material compósito no qual a ligação consiste inteiramente de um polímero orgânico sintético, sendo vulgarmente conhecido como um betão de resina sintética, betão de resina plástica ou simplesmente betão de resina. O facto de se usar um polímero, em vez de um cimento representa uma vantagem substancial, sobretudo em Arquitectura, uma vez que os polímeros podem ser usados somente em aplicações, nas quais o elevado custo possa ser justificado pela superioridade e/ou excelência de propriedades, conciliando ao mesmo tempo a esbelteza e/ou a estética do componente estrutural [2].

Os compósitos em betão polimérico têm boa resistência ao ataque químico e a outros agentes corrosivos, muito baixas propriedades de absorção de água, boa resistência à abrasão e marcada resistência à congelação – descongelação. Tendo em conta a maior resistência dos betões poliméricos em relação aos betões convencionais, torna-se possível reduzir significativamente a secção das peças. Por outro lado, como o material no interior fica bem protegido do meio exterior são possíveis recobrimentos muito menores do que no betão armado tradicional. Isto coloca o betão polimérico numa base competitiva com o betão de cimento em certas aplicações especiais. A resistência química e as propriedades físicas são geralmente determinadas pela natureza do polímero de ligação em maior extensão, do que pelo tipo e quantidade de finos usados no agregado.

Dada a grande resistência do betão polimérico em comparação com o betão de cimento Portland, poder-se-á obter ganhos em termos de quantidade de material, colocando o betão polimérico numa base competitiva com o betão de cimento em certas aplicações especiais.

A resistência química e as propriedades físicas são geralmente determinadas pela natureza do polímero de ligação em maior extensão, do que pelo tipo e quantidade de agregado.

As propriedades viscoelásticas do polímero de ligação são responsáveis pelos elevados valores de fluência o que constitui um factor de usos restrito do betão polimérico em aplicações estruturais. A sua resposta à deformação é altamente variável, dependendo da sua formulação sendo a sua deformação à fractura por tracção geralmente de 1%. A deformação por contracção varia com o tipo de polímero usado (alta para poliéster e baixa para uma ligação à base de epóxido) e o resultado obtido é específico de cada aplicação [3].

#### **1.4 APLICAÇÕES DO BETÃO POLIMÉRICO**

Inicialmente, para além do uso do betão polimérico em revestimentos pré-moldados, este também era utilizado em lavatórios, e outros tipos de produtos sanitários. Tem sido

feito um esforço considerável para desenvolver e utilizar o betão polimérico como um material de reparação de betão. A sua rápida cura, excelente ligação ao betão e às armaduras de aço, excelente resistência e durabilidade tornam-no num material de reparação muito atraente.

Como argamassa, o betão polimérico pode ser colocado numa espessura inferior a 10mm. No entanto, este não se tornou um material amplamente utilizado na reparação, como inicialmente previsto, devido ao custo, à falta de conhecimento por parte dos contratantes, e à competição entre materiais de reparação. Actualmente, a maior parte das aplicações em betão polimérico encontram-se na forma de elementos pré-moldados. Em princípio, estes elementos são apenas painéis ou placas usadas com função não estrutural, embora outros produtos tenham surgido no mercado no início da década de 70, incluindo infra-estruturas de drenagens e/ou esgotos no rés-do-chão dos edifícios, valas e/ou fossas, guardas de trincheiras públicas e ainda túneis públicos, revestimentos ou coberturas, isoladores de alta tensão e revestimentos ou barreiras intermédias nas principais vias rodoviárias. Entretanto apareceram outros produtos, como portas de visita ou de inspecção, portas de acesso para limpeza (de redes de esgotos, etc.) e bases de máquinas ferramentas. Tudo isto, em antecipação a muitos outros e novos materiais para novas utilizações que foram postas no mercado, o que constitui um marco histórico significativo no dealbar do século 20. As investigações continuam para cada uma das utilizações, tais como painéis balísticos, pólos de transmissão eléctrica, placas sanduíche, blocos para a construção, valas ou fossas públicas, guardas de trincheiras, coberturas e/ou revestimentos públicos subterrâneos e placas de isolamento [2].

Inicialmente, as resinas epoxídicas eram utilizadas como auxiliares de outros materiais e também como adesivos. A primeira aplicação importante de resinas epoxídicas na construção civil aconteceu em 1954 quando a California State Highway Department utilizou-a para colar sinais de trânsito. Desde então a utilização das resinas epoxídicas na construção civil adquiriu maior importância [4]. Com a aplicação destas resinas é possível obter resultados bastante favoráveis no campo da construção civil, principalmente quando utilizadas em:

- juntas flexíveis

- união entre betão velho e betão novo
- revestimentos de depósitos destinados a produtos agressivos
- membranas impermeabilizantes e pinturas anticorrosivas
- argamassas para reparação
- aditivos para melhorar as propriedades do betão
- pisos industriais

Além da utilização na construção civil, as resinas epoxídicas também são aplicadas noutros segmentos:

- Equipamentos desportivos
- Protecção anticorrosiva para tanques de aço
- Transformadores de energia eléctrica
- Primer anticorrosivo aplicado por electrodeposição
- Casco de veleiro de competição
- Revestimentos de alta performance
- Revestimento anticorrosivo em navios
- Aplicação de tinta em pó

## **1.5 LIMITAÇÕES**

Polímeros em betão têm feito grandes avanços ao longo dos últimos 40 - 30 anos. Primeiro, deve-se entender que uma das principais limitações materiais de betão polimérico é o seu custo. O custo dos polímeros podem variar de 10 a 100 vezes a do cimento Portland, e mesmo considerando que peso específico do cimento é cerca de 2,5

vezes o da resina, o custo por unidade de volume de compósitos poliméricos está ainda consideravelmente superior ao betão de cimento Portland. Devido a este custo mais elevado, o volume de betão polimérico por unidade de área deve ser minimizado o que torna a sua utilização para aplicações de elevado volume, por exemplo, pavimentos, fundações, calçadas e estruturas hidráulicas impraticável.

Outra limitação é a sua incapacidade de suportar altas temperaturas, especialmente incêndios, portanto, este tipo de material não deve ser utilizado sem protecção como estrutura de edifícios de habitação.

Uma terceira limitação é o odor e/ou toxicidade e/ou flamabilidade de muitos dos monómeros e resinas durante a construção ou fabrico. Apesar de estas limitações só ocorrerem para um período de tempo relativamente curto até à sua cura, o uso destes materiais pode criar problemas de segurança e / ou desconforto para o trabalhador que devem ser tomados em conta durante a construção.

## **1.6 MATERIAIS**

### **1.6.1 POLÍMERO**

Polímeros podem ser classificados, como termoplásticos e termorígidos. Os polímeros termoplásticos amolecem quando aquecidos e endurecem quando arrefecidos. É necessária a simultânea aplicação de calor e pressão para fabricar estes materiais. A nível molecular, quando a temperatura é aumentada, as forças de ligação secundárias são diminuídas para que o movimento relativo das cadeias adjacentes seja facilitado quando são aplicadas tensões. Os polímeros termoplásticos são polímeros lineares, com estruturas ramificadas e cadeias flexíveis, tornando-os muito macios e dúcteis. Os termoplásticos comerciais mais conhecidos são [5]:

- Cloreto de Polivinil (PVC);
- Polimetilmetacrilato;
- Poliestireno.

Os polímeros termorígidos tornam-se plásticos durante o seu primeiro aquecimento e depois permanentemente rígidos quando arrefecidos. Desta forma, este tipo de polímeros não pode ser remoldado nem a sua forma pode ser alterada por aquecimento subsequente.

Os polímeros termorígidos, durante o aquecimento inicial, formam ligações cruzadas covalentes entre a cadeia molecular adjacente. Estas ligações unem as cadeias de modo a resistir a movimentos de vibração e rotacionais a altas temperaturas. As ligações cruzadas são geralmente extensas, sendo que 10 a 15% das unidades da cadeia são unidas por ligações cruzadas. Apenas o aquecimento a temperaturas excessivamente altas poderá causar o rompimento destas ligações cruzadas e consequente degradação do polímero. Este tipo de polímeros são mais duros, fortes e mais frágeis que os termoplásticos e possuem uma melhor estabilidade dimensional e são mais usados em processo que requerem altas temperaturas. Os termorígidos não podem ser reciclados, não derretem e são mais quimicamente inertes que os termoplásticos. Os termorígidos comerciais mais conhecidos são [5]:

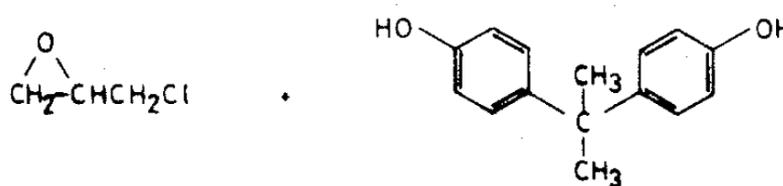
- Resinas Epoxídicas
- Resinas de polyester
- Borracha vulcanizada
- Fenólicos

#### **1.6.1.1 Resina epoxídica**

A palavra “epoxy” é derivada do prefixo Grego “ep”, que significa “sobre e no meio”, e “oxy”, a forma de combinação do oxigénio. A maioria das resinas epoxídicas fornecem termorígidos amorfos com excelente resistência mecânica e rigidez, excelente resistência química e à corrosão, boas propriedades térmicas, ligantes e eléctricas, pouco encolhimento durante a cura e estabilidade dimensional, propriedades pouco comuns na maioria dos plásticos. Estas características superiores de performance, associadas a uma óptima versatilidade, fizeram das resinas um dos materiais de relevo de emprego em revestimentos protectores e em ligações estruturais [6].

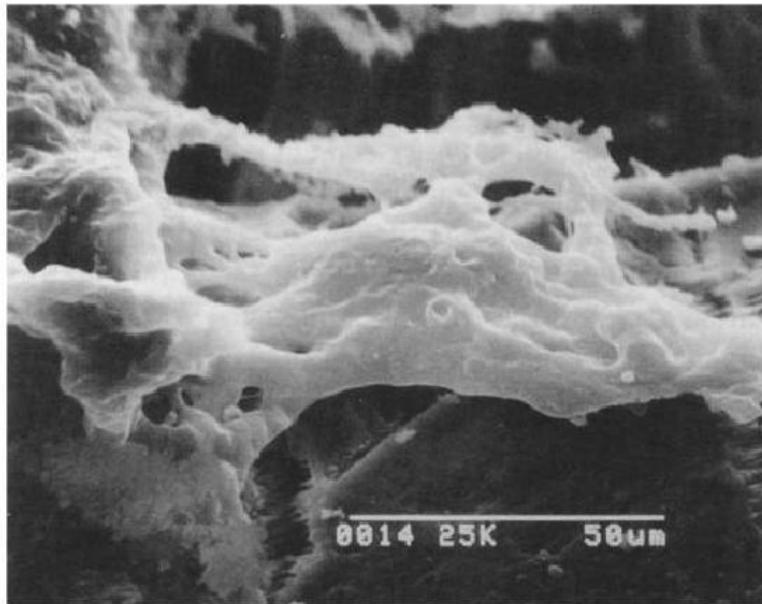
**i) Estrutura Molecular**

A maioria das resinas epoxyídicas é sintetizada pela reacção de uma molécula de bisfenol com duas moléculas de epicloridrina e, contem dois grupos funcionais: o grupo epoxídico e o grupo hidroxílico (Figura 1.1). Os grupos epoxídico e hidroxílico são os pontos de reacção com catalizadores, agentes de cura e copolímeros para a promoção de um polímero tridimensional [7].

**EPICLORIDRINABISFENOL A**

*Figura 1.1 – Constituintes de uma resina epoxyídica [7].*

As resinas epoxyídicas reagem com endurecedores ou agentes de cura tais como: resinas aminoplastos, fenólicas, poliamidas, óleos secativos, amins polifuncionais, resultando em muitos produtos com uma variedade de propriedades. As resinas baseadas neste tipo de reacção são fornecidas em dois recipientes separados, um contendo a resina epoxyídica e outro o agente de cura. Os componentes devem ser misturados nas proporções indicadas antes da sua utilização, estas resinas funcionam com secagem ao ar. Tendo em conta que a formulação de epóxido se produz com reacção química, as proporções resina/endurecedor devem respeitar-se estritamente em cada sistema, já que qualquer defeito ou excesso debilitará as propriedades do produto obtido [7].



*Figura 1.2 – Resina epoxídica vista no microscópio eletrônico [1]*

Os agentes de cura quando aquecidos em conjunto são inativos a temperaturas ordinárias, pelo que se decompõem em componentes activos. Os mais empregues são os anidridos orgânicos, as aminas primárias e aromáticas e os catalisadores (bases fortes como aminas terciárias e compostos fortemente aceitadores de prótons). Como regra geral pode dizer-se que dão lugar a produtos com altas temperaturas de distorção e boas propriedades físicas, eléctricas e químicas. Existe uma ampla gama de endurecedores, podendo ser classificados como agentes de cura a frio e agentes de cura a quente. Os agentes de cura a frio reagem com as resinas a temperaturas ordinárias em atmosferas particularmente húmidas. Os tipos de epóxido mais comuns são os curados com poliamida e os curados com amina. Os epóxidos curados a poliamida têm maior resistência à água e os curados a amina têm maior resistência química. Outros agentes de cura são usados, como as mástiques epoxídicos. O último desenvolvimento neste material consiste em formulações de película fina, usadas como selantes para o revestimento de sistemas de revestimento existentes baseados em óleo e alquídicos [2].

A reacção de endurecimento das resinas de epóxido é exotérmica, aumentando a velocidade de reacção ao aumentar a temperatura. Esta elevação da temperatura do sistema pode ser considerável e depende não só da reactividade da resina e do endurecedor, mas também da temperatura ambiente, quantidade de mistura e

possibilidade de dissipação do calor produzido. Um controle da reacção pode realizar-se mediante a medida da temperatura alcançada pela mistura em função do tempo. O calor associado à reacção provoca retracção ou contracção no produto final que vai desde 1% a 16% em volume, dependendo da formulação. Embora pareça estranho, a elevada contracção é muitas vezes aproveitada pelos produtores de betão polimérico para uma rápida desmoldagem [2].

A ligação química entre a resina (ligante) e o agente de cura afecta as características de aplicação e desempenho do sistema. Por vezes é necessário um compromisso para obter um balanço das propriedades de desempenho e facilidade de aplicação. Para atingir isto através da compreensão técnica, devemos avaliar as resinas e os agentes de cura simultaneamente. A contribuição da resina é significativa na medida em que ocupa metade do volume do sistema polimérico ou por vezes mais. A resina usada afecta grandemente a resistência química e as propriedades físicas e a viscosidade da resina tem uma influência significativa na formulação final e nas características de trabalho.

A Figura 1.3 apresenta a estrutura química de uma resina epoxídica típica. A um nível teórico, as resinas epoxídicas são barreiras que impedem o transporte da água através da película. Na prática no entanto é permeável ao oxigénio e à água [7].

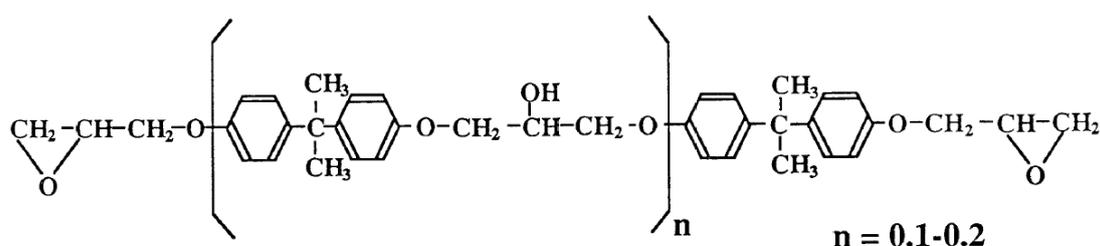


Figura 1.3 – Estrutura química de uma resina epoxídica típica [1]

## ii) Método de utilização

A viscosidade de sistemas de resina epoxídica varia muito com a formulação e com a temperatura. Quando a temperatura do material é tépida, a viscosidade diminui e a trabalhabilidade melhora, mas o “pot life” da resina é reduzido. O “pot life” é o espaço de tempo limitado pela mistura dos componentes e o aumento brusco da viscosidade do material que torna impossível a sua aplicação. Os valores dos tempos de cura das

resinas epoxídicas e das resistências variam dramaticamente e tendem a ter uma lenta estabilidade, continuando a ganhar resistência durante semanas, o que não impede que a sua formulação seja de molde a permitir uma cura rápida, sendo as resinas epoxídicas resistentes à maioria dos químicos e podendo a sua formulação ocorrer debaixo de numerosas condições de humidade e temperatura [2].

Os betões poliméricos de resinas epoxídicas são normalmente preparados pelos utilizadores mediante muitas formulações de resinas epoxídicas que são viáveis ou praticáveis. A selecção do material para uma particular aplicação deve basear-se em informação específica dos produtos dos fabricantes e nos dados das características de campo fornecidas pelos mesmos. As resinas de epóxido encontram-se disponíveis para serem usadas numa variedade de aplicações sob diversas condições de temperatura. A relação dos dois componentes nunca deve ser ajustada mediante a mudança do tempo de cura ou alteração do mesmo. As resinas de epóxido são consideradas alergénicas, pelo que são necessários cuidados especiais de segurança [2].

### **iii) Propriedades**

O processo de cura é promovido através da combinação com grupos funcionais reactivos (sistemas mono ou poli componentes) os quais estão presentes em um catalisador e/ou endurecedor (e.g. aminas alifáticas e aromáticas, anidridos e endurecedores catalíticos). As propriedades físicas da rede dependem da resina e do endurecedor, da extensão da cura, do tempo e temperatura de cura [8].

A resina epoxídica à base de diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA) é uma resina epoxídica difuncional, líquida e de baixo peso molecular mais comumente utilizada por apresentar boa fluidez, baixa retracção durante a cura e fácil processamento. As resinas à base de bisfenol F (DGEBF), no entanto, geralmente apresentam baixa viscosidade, permitindo a incorporação de altos teores de cargas. As resinas epoxídicas contêm grupos epóxido – um átomo de oxigénio ligado de forma cíclica a dois átomos de carbono – na sua estrutura química. Devido à alta reactividade, o anel epoxy pode reagir com muitos endurecedores, obtendo-se propriedades físicas, químicas e mecânicas diferenciadas [9].

As resinas epoxídicas têm um importante papel na classe dos materiais poliméricos termorígidos [10] sendo utilizadas em aplicações que requerem alta estabilidade térmica, boa resistência à tração e à compressão, alto módulo de elasticidade e boa resistência química [11]. Por outro lado, normalmente são frágeis e apresentam baixa resistência à propagação de trincas [12], devido à formação de polímeros altamente reticulados durante a cura.

A resina epoxídica é o principal polímero termorígido para aplicações de engenharia de compósitos poliméricos devido à baixa retracção durante a cura, excelente adesão a uma variedade de superfícies, boa estabilidade dimensional, baixa absorção de humidade, boas propriedades térmicas e eléctricas, excelente resistência química e a intempéries com alta relação resistência/peso.

Porém, possui uma baixa resistência ao impacto, devido a sua característica vítrea. O aumento de sua tenacidade promove uma maior resistência ao impacto e um aumento na resistência ao início e propagação da fractura. Estudos revelam que segmentos flexíveis introduzidos sob a forma de agentes flexibilizantes são capazes de controlar as fissuras originadas durante um teste mecânico [13]. Os processos de tenacificação e a flexibilização da resina epoxídica com elastómeros líquidos têm sido estudados há algumas décadas. Entretanto, somente há pouco tempo estes processos de melhoria de propriedades mecânicas da resina epoxídica curada, principalmente resistência ao impacto e à fractura, têm sido aplicados no desenvolvimento de adesivos estruturais.

A resina epoxídica é largamente utilizada no desenvolvimento de adesivos estruturais e revestimentos, dado às suas capacidades de adesão. A sua vantagem em relação aos outros adesivos poliméricos está associada à presença dos grupos funcionais, que promovem um aumento da polaridade da molécula, possibilitando a sua interacção com diversos materiais.

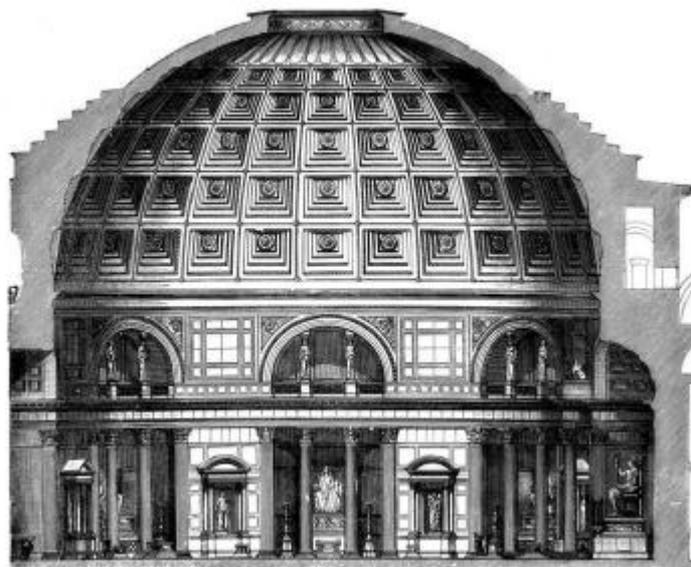
### **1.6.2 AGREGADOS LEVES**

A principal limitação das resinas epoxídicas é o seu custo, sendo significamente maior que o betão de cimento Portland. O custo alto das resinas epoxídicas faz o seu uso ser

quase proibitivo para aplicações de grande volume, excepto para os casos em que o desejo pela durabilidade prevalece, fazendo o betão de cimento impossível de aplicar.

Uma das maneiras de minimizar esta limitação é o desenvolvimento de um composto de resina e agregados leves. A classe geral de agregados leves envolve um lote variado de produtos. Um grande espectro de agregados leves tem sido produzido e\ou aplicados nos últimos anos em construção.

Estes envolvem produtos naturais\minerais, tais como madeira, cortiça, casca de arroz, borracha e produtos de origem vulcânica, produtos de origem artificial especialmente fabricados para o efeito, tais como argila expandida, xisto ou ardósia e também subprodutos e desperdícios industriais tais como escória expandida e desperdícios da construção civil. Os agregados leves e os betões leves são materiais que têm já uma longa história. Conhecem-se inúmeros exemplos da sua aplicação estrutural em importantes edifícios, desde o império romano até à actualidade. Tanto o Coliseu como o Panteão de Roma, foram parcialmente construídos com materiais que podem ser designados por betões leves (agregados de lava, fragmentos de tijolo e pedra-pomes); outro exemplo é o da Basílica de Sainte Sophie na Constantinopla, feita com diatomite [14].



*Figura 1.4 – Panteão de Roma.*

Os agregados leves artificiais têm vindo a ser produzidos desde o início do século XX nos Estados Unidos e, desde os anos 60, os exemplos de estruturas de betão feitas com agregados leves têm-se vindo a multiplicar pelo mundo fora. Porém, apenas nos anos 70 foi feito um esforço significativo de pesquisa dos agregados leves. Deste então, foram realizadas diversas investigações em argamassas e betão de cimento Portland com agregados leves e foi feito um esforço para encorajar o uso estrutural destes materiais pelas suas vantagens ambientais, económicas e técnicas. As vantagens dos materiais de baixa densidade são muito numerosas, por exemplo: redução do peso global, maior rapidez de construção, possível menor custo e facilidade de transporte. O peso próprio de um edifício é um factor importante para o projecto do mesmo, principalmente hoje em dia em que a tendência é a construção de edifícios cada vez mais altos. Os agregados leves tornam a densidade do betão mais baixa que o tijolo verificando-se uma redução no peso próprio da estrutura. Outra característica é a melhoria no isolamento térmico e acústico que proporciona em relação aos betões sem agregados leves.

A resistência e rigidez dos agregados depende da sua composição, textura e estrutura, e as propriedades dos agregados influenciam, entre outros, a resistência à compressão do betão [14].

A ligação entre o agregado e o sistema de resina é um importante factor na resistência do betão. A natureza desta ligação é, em parte, devida à dureza e a uma melhor ligação resultante do encadeamento mecânico. É também afectada por outras propriedades físicas e químicas dos agregados, designadamente, a composição mineralógica e química e a condição electrostática das partículas à superfície, as quais têm, também, uma influência significativa no comportamento da ligação. A superfície do agregado deve ser limpa e livre de partículas de argila ou barro aderentes e os agregados devem ser secos antes de serem misturados com a resina. Este aspecto é muito importante, dada a potencial inibição da cura da resina em ambientes húmidos [14].

## **1.7 OBJECTIVOS E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Este trabalho de investigação tem por principais objectivos analisar o comportamento de quatro tipos de argamassas poliméricas à base de resinas epoxídicas com dois tipos de agregados leves: pó de cortiça e pó de borracha quando sujeitas a ciclos de molhagem-secagem em ambiente salino e em ambientes ácidos.

No capítulo 2 apresentam-se os principais meios de ataque às estruturas de betão em geral pelo meio ambiente, referindo-se as principais preocupações a ter. Em particular, referem-se também os principais factores de degradação dos polímeros.

No capítulo 3 apresenta-se uma panorâmica geral sobre os trabalhos de investigação realizados por diversos autores acerca das propriedades mecânicas e físicas do betão polimérico, assim como o seu comportamento face a vários tipos de agentes, tais como temperatura, nevoeiro salino, humidade e ácidos.

O capítulo 4 trata da caracterização dos materiais utilizados para realização dos provetes de argamassas poliméricas de agregados leves, ou seja, das resinas epoxídicas e dos agregados leves utilizados.

O capítulo 5 descreve a preparação dos modelos e os ensaios realizados para o estudo da durabilidade das argamassas poliméricas em estudo.

No capítulo 6 apresentam-se os resultados dos ensaios experimentais e a respectiva análise do comportamento do material em estudo face aos vários agentes de degradação.

No capítulo 7 apresentam-se as principais conclusões obtidas pela realização deste trabalho e são referidos alguns aspectos que poderão ser desenvolvidos no futuro.



## Capítulo 2

### **MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO**

Neste capítulo apresentam-se os aspectos gerais acerca da durabilidade do betão. Visto que o âmbito da presente dissertação foca a durabilidade de um material com a ser utilizado em construção, em primeiro lugar, far-se-á uma abordagem do conceito de durabilidade das estruturas de betão em geral, assim como a forma de ataque feito às mesmas pelo meio ambiental, seja pelo ataque de sais, ácidos, poluição, etc., transmitindo desta forma o porquê da importância deste estudo.

Para além dos aspectos gerais de durabilidade do betão comum, torna-se importante referir também a forma de degradação dos polímeros, particularizando assim o material em estudo na presente dissertação. Dentro dos factores que afectam a degradação dos polímeros, salientam-se o seu peso molecular, presença de aditivos, tamanho das moléculas, composição química, as suas ligações químicas e as condições ambientais.

#### **2.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE DURABILIDADE, DESEMPENHO, VIDA ÚTIL E MANUTENÇÃO DAS ESTRUTURAS DE BETÃO**

Os problemas mais comuns de durabilidade dos betões em geral estão directamente ligados à sua porosidade e aos mecanismos de penetração dos agentes agressivos. Em

geral, quanto maiores forem os factores que facilitem o ataque dos agentes agressivos no betão, maior será a deterioração do material. Assim, a porosidade (tamanho e distribuição dos poros) é um factor que influi na capacidade do betão em suportar o efeito destrutivo de agentes agressivos (água, oxigénio, dióxido de carbono, cloretos e soluções ácidas [15]).

Em qualquer situação em que se aplique betão, devem-se efectuar inspecções periódicas para que as anomalias sejam diagnosticadas e corrigidas a tempo, mediante um tratamento apropriado. Isto é especialmente importante em complexos industriais, estruturas portuárias, centrais térmicas e nucleares, construções marítimas, esgotos e em todas as obras nas quais o meio possa actuar desfavoravelmente, provocando a corrosão das armaduras do betão.

O dióxido de enxofre é um dos poluentes mais comuns na atmosfera, apontando como suas fontes mais prováveis: as combustões domésticas, as emissões das fábricas termoeléctricas, das refinarias de petróleo, das fábricas de aço e ferro, na qual estes poluentes reagem com o vapor de água presente na atmosfera e pode-se precipitar sob a forma de chuva ácida, que se acumula sobre as construções e, ao evaporar, permite a deposição dos sais nela contidos. Este fenómeno vai progressivamente aumentando a concentração de iões agressivos na superfície e no interior dos materiais constituintes das edificações, como o caso dos sulfatos [16].

Segundo Helene [17], as atmosferas industriais podem acelerar de 60 a 80 vezes mais o processo de corrosão, quando comparadas a situações equivalentes em atmosferas rurais. Isto ocorre devido à acção de gases ácidos que reduzem a alcalinidade do betão ou mesmo degradando a camada de recobrimento, facilitando a penetração e acção dos agentes agressivos.

A construção civil tem como tendência utilizar cada vez mais sistemas que garantam protecção às estruturas de betão, o que tem contribuído para o surgimento de novos produtos e técnicas de execução. Quando o objectivo que se pretende é o aumento da vida útil da estrutura, várias alternativas são viáveis, umas com maior eficácia técnica outras relação custo\benefício.

A durabilidade dos materiais está ligada à sua capacidade de se manter em determinado estado, com a mesma qualidade ao longo de um determinado tempo. De outra forma, é a resistência de um material à deterioração ou degradação. Este conceito está intimamente ligado com o desempenho de um produto em serviço, sujeito às exigências do utilizador [18].

No caso específico do betão, a durabilidade pode ser definida como a capacidade deste material de resistir às acções ambientais, ataques químicos, efeitos físicos ou quaisquer outros processos de deterioração, mantendo as suas características dentro de certos limites, qualidade e capacidade de utilização dentro dos níveis exigidos [19].

Para que se desenvolva um processo de deterioração de um material é necessário que haja uma interacção entre a estrutura interna e os agentes degradantes, provenientes do ambiente exterior ou incorporados involuntariamente no material durante a sua produção. Essa interacção depende basicamente do tipo e intensidade dos agentes agressivos, bem como das características do material, especialmente da sua estrutura de poros, que governam os mecanismos de entrada de fluidos. O betão convencional é normalmente um material poroso e permeável aos fluidos. Se a porosidade for grande e os poros estiverem interligados, eles permitem o deslocamento de fluidos através do betão, de forma que a permeabilidade se eleva. Por outro lado, se os poros forem descontínuos ou excessivamente estreitos ou tortuosos para permitir o deslocamento de fluidos, a permeabilidade do betão baixa, mesmo com a porosidade alta. A durabilidade do betão depende, portanto, da facilidade com que estes fluidos, líquidos e gases, ingressam no betão e se deslocam no seu interior. No caso do betão, o deslocamento de diversos fluidos realiza-se não somente por decorrência do meio poroso, mas também por difusão e absorção. Na difusão o fluido desloca-se por efeito de uma diferença de concentração, enquanto na absorção o deslocamento está relacionado ao fenómeno de capilaridade [16].

Às consequências dos processos de alteração que venham afectar o desempenho de uma estrutura, ou material, costuma chamar-se deterioração. Cada material ou componente reage de uma forma particular aos agentes de deterioração a que é submetido, sendo a forma de deterioração e a sua velocidade função da natureza do material ou componente e das condições de exposição aos agentes de deterioração. Os tempos modernos ditaram

a certeza de que o betão, como material de construção, é instável ao longo do tempo, alterando as suas propriedades físicas e químicas em função das características dos seus componentes e das respostas destes às condicionantes do meio ambiente [20]. Deve-se entender que na concepção de uma construção durável deve-se tomar uma série de decisões que garantam à estrutura e aos materiais que a compõem um desempenho satisfatório ao longo da vida útil da construção. Hoje em dia, ao projectarem-se estruturas, as características de durabilidade dos materiais em questão devem ser consideradas com o mesmo cuidado que outros aspectos, tais como propriedades mecânicas e custo inicial.

## **2.2 MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE BETÃO**

### **2.2.1 DETERIORAÇÃO PROVOCADA PELA ÁGUA DO MAR**

O ambiente marítimo caracteriza-se pela acção física das ondas que sujeitam o betão a cargas de impacto, provocando a erosão da superfície por desgaste e cavitação. Para além disto, o betão está exposto às acções químicas dos constituintes agressivos da água do mar, sujeito a ciclos repetitivos de gelo/degelo e de secagem/molhagem. Assim, a deterioração das estruturas de betão neste tipo de ambiente é de natureza química e física. O ataque do ambiente marítimo sobre as estruturas de betão pode ser dividido em três zonas distintas em função do posicionamento do elemento de betão em relação ao nível das ondas do mar. A zona superior, acima da maré alta, não está directamente exposta à água do mar. Contudo, está exposta ao ar atmosférico, acção de geadas e de sais transportados pelos ventos. Na zona entre marés, a estrutura está sujeita a ciclos alternados de secagem/molhagem, gelo/degelo, impactos das ondas e de gelo flutuante e abrasão das areias. A zona inferior, submersa na água, é relativamente estável, onde a acção de gelo/degelo não ocorre. A acção de deterioração predominante é o ataque químico que provoca perda da resistência.

### 2.2.2 EXPOSIÇÃO AOS SAIS

A exposição aos sais resulta numa decomposição do betão devido à expansão cristalina de sais dissolvidos na água imediatamente abaixo da superfície do betão. Os efeitos manifestam-se de duas formas [21]:

- Se o betão colocado em solos cuja água possui um elevado teor de sal, possui uma superfície de exposição para evaporação, a água salina migrará em direcção à superfície exposta por acção capilar e evaporar-se-à na superfície concentrando sais nesta zona, gerando grandes tensões expansivas.
- O betão exposto a condições marinhas, particularmente na zona das marés, irá estar sujeito alternadamente a períodos de salpicagem com água salina e períodos de secagem. A água salina é absorvida, e mais tarde quando se evapora dá origem a elevados níveis de sais nas camadas superficiais.

### 2.2.3 EXPOSIÇÃO AOS ÁCIDOS

Os principais agentes químicos ambientais responsáveis pela deterioração do betão são o dióxido de carbono, águas, ácidos, cloretos e sulfatos. A acção do hidrogénio pode colaborar para a deterioração dos betões, sendo que a origem mais comum para o hidrogénio são os ácidos.

As atmosferas de cidade contêm, normalmente, impurezas em forma de óxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), fuligem ácida ( $\text{pH} \sim 5$ ) e outros agentes agressivos, tais como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{SO}_4$ , etc. Os teores de  $\text{SO}_2$  em grandes centros urbanos são originados pela queima de combustíveis contendo enxofre como, por exemplo, o óleo combustível. O gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) é originado da acção bacteriológica de rios e represas, sendo mais concentrado nesses locais. O  $\text{SO}_4$  é resultante da oxidação do  $\text{SO}_2$  que, na presença de amónia  $\text{NH}_3$  (gás), forma-se um sal (sulfato de amónio –  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ), que é um sólido em suspensão, que se pode depositar nas superfícies das estruturas. Este sal pode dar origem ao  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (ácido sulfúrico), atacando as estruturas de betão [16].

O processo industrial gera uma atmosfera agressiva causando uma série de anomalias nas estruturas de betão. Nas atmosferas industriais em que há emissões de enxofre

( $\text{SO}_2$  e  $\text{SO}_3$ ), estes podem penetrar no betão e reagir com a água, formando ácido sulfúrico. Em metalúrgicas de laminação de aço, os vapores libertados durante o processo de decapagem dos laminados são ricos em ácido clorídrico (HCl) e ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), e quando entram em contacto com as estruturas de betão, aceleram a deterioração das mesmas. Em fábricas que tenham como actividade principal a produção de ácidos acético, ácido anídrico-acético, acetol, ácido sulfúrico ou que utilizam estes compostos como matéria-prima para a produção de derivados, o betão é visivelmente atacado [16].

O ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) é um ácido orgânico e tem o seu pH em torno de 4,0. Este ácido está presente principalmente em indústrias de alimentos e conservas por conter na sua composição bactérias acéticas-acetobacter muito utilizadas comercialmente na produção do vinagre. Este ácido também é encontrado em fábricas de celulose e acetato de vinila, na indústria farmacêutica, na produção de pigmentos e de tinturas reagentes em análises laboratoriais [16].

O ácido láctico também é utilizado há muito tempo, em indústrias de alimentos, em fermentações. Na alimentação é usado como acidulante em produtos de confeitaria, na fabricação de extractos, essências, sucos de frutas e refrigerantes. É utilizado ainda na conservação de carnes, de vegetais e de peixe, cerveja e vinho. Este ácido também é encontrado em produtos farmacêuticos, cosméticos e na indústria química. Na indústria têxtil é usado como reagente para fixar os corantes das fibras para estampar a lã, bem como no preparo de couros e pele. Emprega-se ainda no fabrico de plásticos [16].

O ácido fórmico ou oficialmente ácido metanóico,  $\text{CH}_2\text{O}_2$ , massa molecular 46 u, é um ácido monocarboxílico com fórmula estrutural  $\text{H}-\text{COOH}$ . É o mais simples dos ácidos orgânicos. O ácido fórmico é um ácido monocarboxílico da família do ácido acético (vinagre) e ácido láctico (leite). Inicialmente era extraído de formigas vermelhas por destilação em vapor de água, daí o nome fórmico. As suas moléculas atraem-se por pontes de hidrogénio. É encontrado na natureza no mel, em vegetais, em frutos cítricos, na produção do vinho e mundialmente utilizado na irradiação (preservação) de alimentos, entre outros. Frequentemente utilizado como fixador de corantes em tecidos, como acaricida, na medicina para o tratamento do reumatismo, na produção da cafeína, adoçantes artificiais e em formulações para alisamento de cabelos. Outra função do

ácido fórmico é no controlo do PH. É também utilizado como bactericida e na conservação de cadáveres devido a sua característica em retirar a humidade dos tecidos. Este tipo de ácido está presente nas indústrias de celulose e papel, em tinturarias e em indústrias de conservas. Nos ambientes industriais onde este ácido está presente, as instalações são atacadas mesmo por soluções de concentração muito baixas.

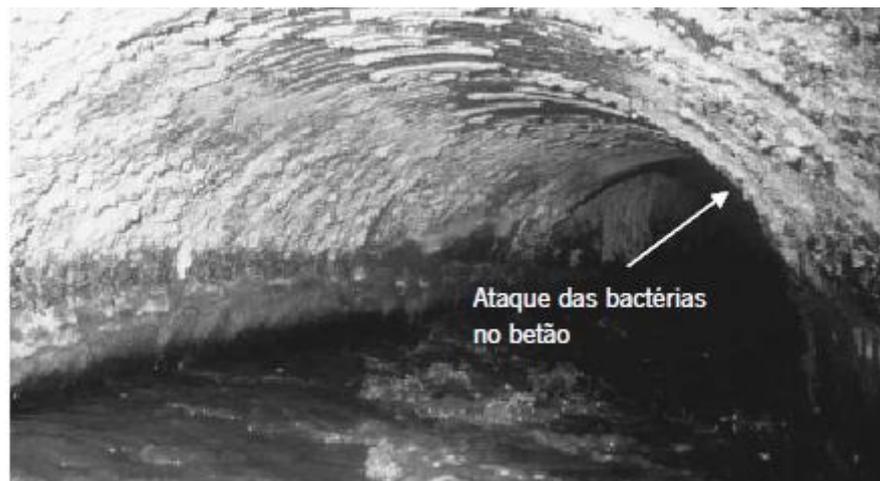
O ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) tem o pH mais baixo, à volta de 1,0, sendo um ácido forte e o mais importante na indústria do laboratório. O maior consumo de ácido sulfúrico é no fabrico de fertilizantes, como os super fosfatos e o sulfato de amónio, sendo também o ácido dos acumuladores de chumbo (baterias) usados nos automóveis. É consumido em enormes quantidades em inúmeros processos industriais, como processos da indústria petroquímica, refinamento de óleos minerais, produção do álcool etílico, tratamento de minérios e metais, na indústria metalúrgica e galvanoplastia, na indústria cosmética, fabrico de corantes, fabrico de papel e fabrico de detergentes [16].

Os agentes químicos actuam com maior intensidade nas áreas das indústrias onde são fabricados e armazenados ou ainda nas áreas onde fazem parte do processo. No entanto, quando libertados na atmosfera ou levados por resíduo líquido, atingem as demais áreas e passam a fazer parte do diagnóstico das manifestações patológicas ali instaladas [23].

Nas atmosferas viciadas, que são locais fechados com baixa taxa de renovação de ar, as estruturas de betão também sofrem deterioração. O exemplo mais expressivo é a acção do ácido sulfúrico gerado em colectores de esgoto, a partir da presença de sulfatos ( $SO_4^-$ ). À medida que o esgoto flui pela rede colectora, a concentração de oxigénio dissolvido diminui gradativamente, devido a uma demanda que é maior que o fornecimento. Em algum ponto do sistema, o oxigénio é esgotado e os sulfetos aparecem [16].

O teor de sulfatos no esgoto pode ter origem em duas causas: produtos resultantes de acção bacteriológica e descarga directa de esgotos industriais nos colectores. A água potável contém certo teor de sulfatos que é incrementado após o seu uso. As bactérias precisam de oxigénio para consumir a matéria orgânica e quando o oxigénio livre não é disponível, certas espécies obtêm o mesmo ião sulfato ( $SO_4^-$ ), deixando livre o ião sulfeto ( $S^-$ ). A reacção do sulfeto com a água resulta no ião  $HS^-$  e gás sulfídrico ( $H_2S$ ).

Esse gás libertado é absorvido pelas partes superiores do colector, sendo novamente oxidado por acção de bactérias aeróbias e transformado em ácido sulfúrico. Islander et al [24] reportaram que o pior caso do pH do ácido sulfúrico na natureza encontra-se em ambientes de esgotos com valor de 0,5 (próximo do pH de uma solução de ácido sulfúrico 3%). Na Figura 2.1 é possível observar o ataque do betão pelo ácido sulfúrico produzido por bactérias.



*Figura 2.1 - As bactérias nos sistemas de esgotos produzem ácido sulfúrico que ataca o betão.*

## **2.3 FACTORES QUE AFECTAM A DEGRADAÇÃO DE POLÍMEROS**

Em geral, o processo de degradação de polímeros afecta a estabilidade térmica, as propriedades mecânicas, cristalinidade, etc. A degradação das resinas epoxídicas é afectada por diversos factores: composição química, peso molecular, tamanho das moléculas, aditivos, ligações químicas, condições ambientais, entre outros.

### **2.3.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA**

A composição química dos polímeros desempenha um papel importante na sua degradação. A presença de apenas cadeias longas de carbono nas resinas termoplásticas torna estes polímeros não susceptíveis à degradação por micro-organismos. Pela incorporação de heterogrupos, tais como o oxigénio, na cadeia de polímeros torna os polímeros instáveis para a degradação térmica e biodegradação. A presença do

heteroátomo na cadeia de polímero afecta a força das ligações vizinhas de C-H do polímero [25].

### **2.3.2 PESO MOLECULAR**

O aumento do peso molecular dos polímeros diminui a taxa de degradação. Tem sido relatado que alguns microorganismos degradam polímeros com baixo peso molecular mais rapidamente quando comparado com os polímeros de elevado peso molecular. Os polímeros com peso molecular menor que 620 fortalece o crescimento de micróbios [25].

### **2.3.3 TAMANHO DAS MOLÉCULAS**

O tamanho das moléculas nos polímeros afecta a sua degradação mecânica, degradação térmica e biodegradação. Esta degradação aumenta à medida que o tamanho das moléculas diminui [25].

### **2.3.4 ADITIVOS**

Impurezas não-poliméricas (como os resíduos da polimerização de catalisadores, produtos de transformação de aditivos), agregados ou pigmentos afectam a resistência à degradação. A dispersão e adesão interfacial entre o agregado e o polímero termoplástico são os factores importantes que afectam a estabilidade térmica do sistema composto [25].

### **2.3.5 LIGAÇÕES QUÍMICAS**

As ligações afectam o grau de degradação dos polímeros. Nos termoplásticos, a adição de unidades de monómeros durante a polimerização cria pontos fracos que tornam os plásticos sensíveis à degradação. A ramificação das cadeias de polímeros aumenta a degradação térmica. As ligações cruzadas diminuem a taxa de fotodegradação pois travam a estrutura do polímero e previnem o desdobramento lamelar [25].

### **2.3.6 CONDIÇÕES AMBIENTAIS**

A degradação dos polímeros depende das condições ambientais tais como a humidade e a temperatura. Em climas húmidos onde a humidade relativa excede os 70%, a taxa de

degradação dos polímeros aumenta. Temperatura e humidade alta aumentam a degradação hidrolítica dos polímeros, pois a presença de humidade alta, especialmente a altas temperaturas tende a aumentar a sua foto-degradação [25].

## Capítulo 3

### COMPORTAMENTO DE ARGAMASSAS POLIMÉRICAS FACE A ACÇÕES MECÂNICAS E AGENTES AMBIENTAIS

Apresentam-se neste capítulo diversos ensaios realizados por outros autores de modo a melhor entender o comportamento do betão polimérico em geral e betão polimérico com agregados leves em particular. Estes estudos incidem maioritariamente no seu comportamento à fluência, absorção de humidade, compressão, tracção, fluência, coeficiente de expansão térmica e porosidade, tanto com como sem agregados leves.

Foi igualmente estudado o comportamento das argamassas poliméricas quando sujeitas a ensaios de durabilidade. Os ensaios de durabilidade consistiram em submeter provetes de diversos tipos de betão polimérico à acção da temperatura, nevoeiro salino, exposição marinha, radiação ultravioleta, resistência aos carbonatos e sulfatos, ciclos de gelo-degelo e resistência aos ácidos.

#### 3.1 COMPORTAMENTO FÍSICO E MECÂNICO

Chastre Rodrigues e Silva [26] realizaram vários testes de flexão e de compressão monotónica e cíclica de modo a avaliar as características mecânicas de várias formulações de betão polimérico: resina epoxídica EPOSIL 551 com areia (séries A e B) e resina epoxídica Icosit KC 220/60 com areia e agregados (série D). Além destas composições, também prepararam modelos de resinas EPOSIL 551 (série E) e Icosit KC 220/60 (série C) puras.

Os autores [26] prepararam provetes de  $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$  e realizaram os testes de caracterização mecânica, com o propósito de determinar a resistência à tracção e compressão, assim como o seu módulo Elasticidade.

Os testes de flexão (Figura 3.1) mostraram que, em termos de resistência à tracção por flexão, os ensaios das séries A, B e D apresentaram valores médios aproximados (26.3; 27.2 e 26.8 MPa) enquanto que as séries C (36.2 MPa) e E (43.3 MPa), que correspondem a provetes de resina pura, apresentaram maiores valores médios. Isto significa que a adição de areia provocou um decréscimo de resistência à tracção de 38%, nas séries A e B e que a adição de areia com agregados na resina Icosit KC 220/60 (série D) provocou um decréscimo de 26%, quando comparados com os provetes de resina pura. Porém, a Figura 3.1 permite observar que, apesar do decréscimo em resistência, a sua rigidez aumentou.

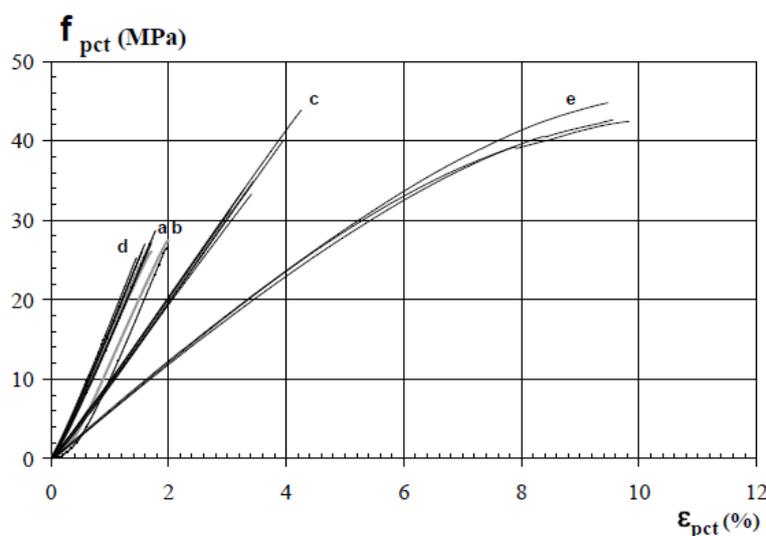


Figura 3.1 - Diagramas tensão-deformação dos ensaios de tracção por flexão dos provetes de resina e de betão polimérico [26].

Os resultados [26] dos ensaios de compressão monotónica permitiram observar que os diagramas de tensão-deformação das séries A e B demonstraram a mesma tendência observada nos testes de tracção por flexão, com a série B a registar uma maior tensão de rotura. Os valores de tensão de rotura da série C foram maiores que os das séries A, B e E, mas menores que os valores encontrados na série D e foi também verificado que as séries C e E são as mais deformáveis. As séries C obtiveram uma resistência à

compressão superior a 90 MPa e as séries E acima dos 45 MPa, para valores de deformação por vezes superiores a 20% (Figuras 3.2 e 3.3).

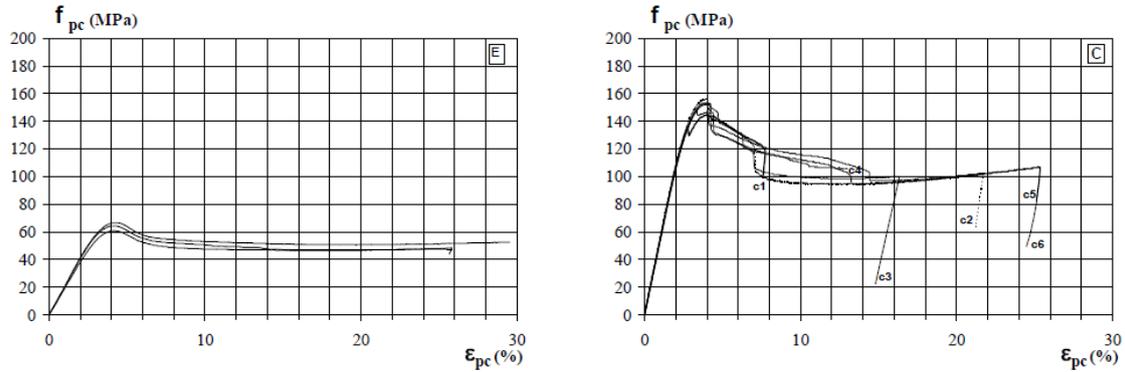


Figura 3.2 – Diagramas de tensão-deformação dos ensaios de compressão monotónica das séries E e C [26].

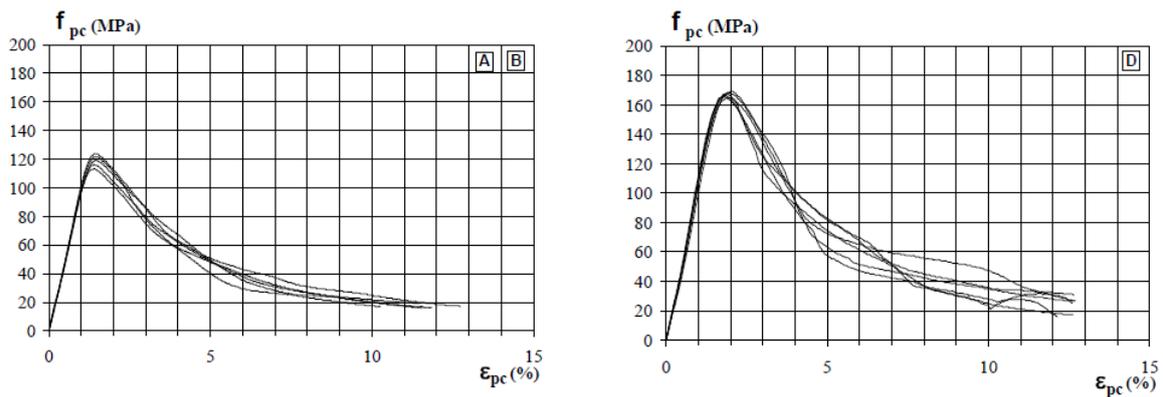


Figura 3.3 – Diagramas de tensão-deformação dos ensaios de compressão monotónica das séries A, B e D [26].

A Série D apresentou as melhores características, revelando valores superiores que a série A. Esta apresentou 43% para a resistência à compressão, 35% de deformação de 35% para a força máxima e 43% para 85% da força máxima, e 7% em termos de módulo Elasticidade. Somente a força de tracção por flexão foi semelhante. O betão polimérico, série D, revelou uma resistência à compressão 10% superior à da série C, uma redução de 50% na deformação, um aumento de módulo elasticidade em 78% e uma redução de 26% em resistência à tracção por flexão quando comparado com os valores observados nos provetes de resina pura, série C. Quanto ao betão polimérico, a série A revelou uma resistência à compressão 82% maior, uma redução de 66% em

deformação, um aumento de valor de módulo de elasticidade de 360% e uma redução de 39% em resistência à tracção por flexão, em comparação com a resina pura, série E.

Os ensaios à compressão cíclica mostraram novamente um melhor comportamento da série D. Porém, enquanto que o seu comportamento melhor em termos de compressão monotónica foi devido a uma resina com melhores características resistentes, o seu comportamento superior em termos de compressão cíclica foi devido a uma curva granulométrica com diferentes agregados de diferentes tamanhos.

Os betões poliméricos possuem excelentes características de amortecimento de vibrações orientando o seu uso em bases de máquinas ferramentas. Martinez-Ramirez, Zamarad et al. [27] citam um estudo feito por Hsu et al, no qual a capacidade de amortecimento do betão polimérico foi dez a quinze vezes maior que a do ferro fundido. Em compósitos poliméricos a matriz de sólido contínuo é engrenada numa longa cadeia de forma complexa em unidades moleculares configuradas. Estas cadeias poliméricas são criadas mediante uma reacção de polimerização no local, de monómeros de resina reactivos de baixo peso molecular.

No mesmo artigo [27], referem que Hsu et al prepararam cilindros em betão polimérico submetendo-os a carregamentos de compressão uniaxial para níveis de tensão de 0,3, 0,4 e 0,5, durante um ano e com o objectivo de investigar o comportamento à fluência. As vigas foram moldadas de betão do tipo metilmetacrilato. Como esperado, para valores elevados do nível de tensão resultou uma grande deformação por fluência, e contrariamente aos resultados obtidos em betão de cimento Portland, os quais mostraram linearidade em fluência, para valores da carga acima do nível de tensão de 0,5. Mais de 20% do valor da fluência final deu-se durante o primeiro dia, e aproximadamente 50% durante os primeiros cinco dias. Por outro lado, no betão convencional, 25% do valor da fluência verifica-se durante o primeiro mês de carregamento e 50% entre os primeiros dois a três meses. Após o rápido aumento das deformações nos estágios anteriores de carregamento, a taxa de deformação diminui e as curvas de deformação por fluência tendem para um nível de após, aproximadamente, dois a três meses de carregamento

Comparando os resultados obtidos com os que dizem respeito a betão de cimento Portland verificou-se que a fluência no betão polimérico é aproximadamente uma a duas vezes maior do que a do betão de cimento Portland, para um nível de tensão de 0,4. Para níveis de tensão maiores, a fluência do betão polimérico aumenta drasticamente, provavelmente devido à resistência sustentada do betão polimérico no nível de tensão de 0,5, o que significa que a fluência específica do betão polimérico, que é a deformação por fluência por unidade de tensão, não se notou ser no intervalo da do betão de cimento Portland (Figura 3.4). A não coincidência de ambas as curvas da Figura 3.4 também indica que o betão polimérico não é um material linearmente viscoelástico e que a deformação específica depende da carga.

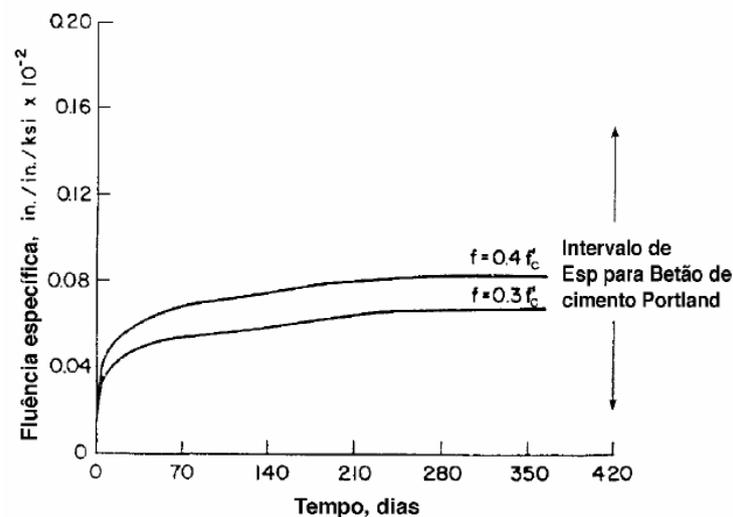


Figura 3.4 - Curvas específicas de fluência para o betão polimérico [11]

A absorção de humidade do betão polimérico é baixa, geralmente 1% ou menos (em peso), e todos os componentes líquidos em misturas frescas polimerizam como um sólido durante a cura, e portanto não são criados poros capilares intersticiais. A maior absorção de humidade é sob a forma de poros discretos na superfície criada (ou perto dela) pela entrada de ar durante a mistura e/ou processos de colocação. Os mesmos autores, citam no artigo referenciado anteriormente [27] Fontana, Jack J. e Reams, Walter, que realizaram investigações efectuadas a este respeito, mostraram que a resistência de determinados polímeros particulares é reduzida pela exposição à água, presumivelmente por causa da deterioração da ligação polímero – agregado, sendo alguns polímeros vulgarmente usados, mais afectados do que outros pela exposição à

água. Este fenómeno é particularmente notado em exposições à água destilada e depende do polímero utilizado.

Rukin, V. V., N. V. Dmitriev, et al. [28] citam Prusinshki, R.C. que verificou que o coeficiente de expansão térmica para betão polimérico varia entre 13 e 26 mm/mm °K. O coeficiente de expansão térmico do betão polimérico é normalmente 1,5 a 2,5 vezes maior que o do aço ou o do betão de cimento Portland. De acordo com os autores esta propriedade reveste-se de enorme importância e significado, em estruturas de betão polimérico rigidamente ligadas a outros materiais, tais como placas e/ou painéis de construção.

Tem sido observado que as argamassas e betões poliméricos têm menores coeficientes de expansão térmica a temperaturas mais baixas, enquanto que as curvas tensão-temperatura são frequentemente bilineares, indicando uma diferença aguda no coeficiente de expansão térmica. Ensaio feitos por Ribeiro et al [29] em argamassas de polyester insaturadas, testadas a temperaturas que variam entre 20 a 60°C, concluíram que a variação da expansão térmica com a temperatura segue uma lei parabólica e não uma lei bilinear.

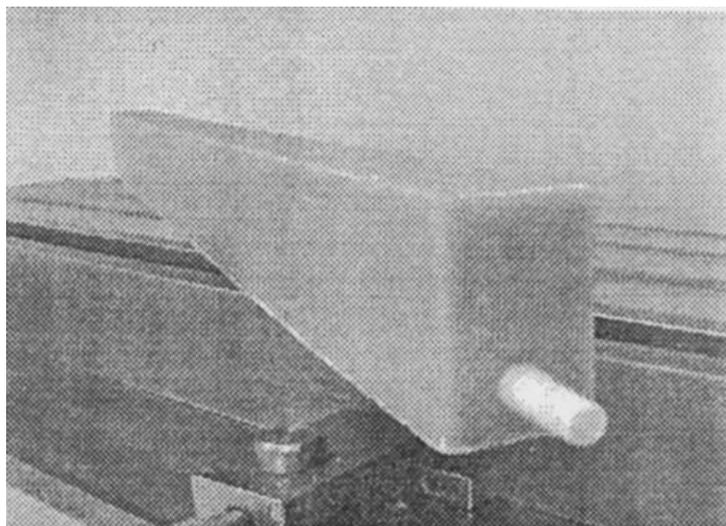
A fluência é importante nos cálculos de projecto em betão polimérico, de deflexões e deformações a longo prazo, e é necessária a realização de ensaios de caracterização da mesma em projectos com misturas específicas. Davydov, S.S., and Ivanov, A. M. [30], observaram que as deformações por fluência geralmente aumentam com o aumento da quantidade de polímero e o comportamento à fluência do betão polimérico é totalmente influenciado pela resina ou monómero utilizado e pelo tipo de agregado

Assim, se o betão polimérico exhibe geralmente o comportamento à fluência do polímero ligante, então as suas deformações por fluência podem ser apreciáveis, mesmo à temperatura ambiente e para baixas tensões aplicadas. Ensaio realizados por Tavares et al. [31] mostram que, para alguns níveis de tensão (substancialmente abaixo da resistência última, a curto prazo), o betão polimérico atinge a rotura por fluência. Quando o nível de tensão aumenta, aumenta também, como é esperado aliás, a deformação por fluência, até que para determinado nível de tensão, a fluência prossegue a curto prazo para a rotura. O fecho da tensão aplicada dá-se para o valor da resistência

última a curto prazo e fixa os resultados de rotura por fluência. Conectando as inflexões ou os pontos de rotura numa família de curvas de fluência resulta o desenvolvimento de uma envolvente de rotura por fluência. Esta descreve as tensões máximas admissíveis de projecto para os betões poliméricos, em diferentes durações antecipadas de carga. Este nível de tensão é cerca de 50% do valor da resistência última a curto prazo, para a maioria dos betões poliméricos e todas as tensões usadas para projecto devem ser factorizadas no sentido de explicar e justificar este comportamento nos betões poliméricos submetidos a carregamento a longo prazo.

Tavares et al. [31] desenvolveram um trabalho de investigação experimental, sobre o comportamento estático e à fadiga, de betão polimérico reforçado com varões pultrudidos de plástico reforçado com fibra de vidro.

Os autores moldaram vigas em betão polimérico de epóxido, cuja formulação óptima se fez com base na análise de Taguchi e de dimensões ( $50 \times 30 \times 600 \text{ mm}^3$ ), sendo aquelas, depois de desmoldadas, curadas à temperatura ambiente e posteriormente submetidas a um tratamento de pós cura. Prepararam-se vigas sem reforço e reforçadas com varões pultrudidos de plástico reforçado com fibra de vidro com 4 e 6mm de diâmetro (Figura 3.5).



*Figura 3.5 - Aspecto final duma viga de betão polimérico reforçada com varão de pultrusão (Plástico reforçado com fibra de vidro).*

Após o tratamento de pós cura, as vigas foram sujeitas a ensaios de flexão em três pontos com um vão de 540 mm, utilizando um equipamento Instron com controlo de deslocamento para duas velocidades de carregamento – 1mm/min e 10mm/min e com o intuito de estudar o efeito da velocidade de carga na resistência à flexão e no módulo de elasticidade.

O mesmo equipamento máquina mas agora com controlo de carga serviu para ensaiar todos os provetes (reforçados e não reforçados) mediante a aplicação de cargas cíclicas, tendo a carga controlada uma variação sinusoidal simples com 3,5 Hz de frequência e 0,5 KN de amplitude. O nível de tensão  $S$  foi definido como  $P_{\text{apli}} / P_{\text{máx}}$ , onde,  $P_{\text{apli}}$ , é o valor da carga aplicada e,  $P_{\text{máx}}$ , é o valor da carga máxima ou carga de rotura, e ensaiaram-se três vigas de cada tipo para cada nível de tensão, sendo estes níveis de 60%, 70% e 80% do valor da carga de rotura. Assim, o número de ciclos até à fractura foi registado no painel de controlo instalado na máquina de ensaio até ao máximo de um milhão de ciclos. Algumas ilações foram extraídas, quer relativamente aos ensaios estáticos, quer quanto aos ensaios de fadiga.

No primeiro caso os autores concluíram o seguinte:

- A carga máxima suportada pelas vigas sem reforço e reforçadas com varões de 4mm de diâmetro é similar e igual a 3KN;
- O deslocamento até à rotura de vigas reforçadas é 5 vezes maior do que o deslocamento até à rotura de vigas não reforçadas;
- As vigas reforçadas com varões de 6mm de diâmetro têm uma carga última 30% maior do que a verificada em vigas não reforçadas e em vigas reforçadas com varões de 4mm de diâmetro;
- Em grande parte, a propagação da fenda é atribuída aos ensaios estáticos, mas a introdução de varões de 4mm de diâmetro aumenta a ductilidade. Usando varões de 6mm de diâmetro melhora o comportamento à fractura das vigas porque dá lugar a uma propagação lenta das fendas que crescem com as condições do modo de mistura.

Quanto ao segundo caso (fadiga) os autores concluíram o seguinte:

- A presença de varões de 4mm de diâmetro aumenta o número de ciclos até à rotura para os níveis de carga de 70 e 80% do valor da carga máxima – as vigas reforçadas podem resistir a 1 milhão de ciclos sem atingir rotura (Figura 3.6);
- As vigas com varão de 6mm de diâmetro, para o nível de tensão de 80% e 1 milhão de ciclos, não quebraram exactamente na situação de colapso (Figura 3.6).

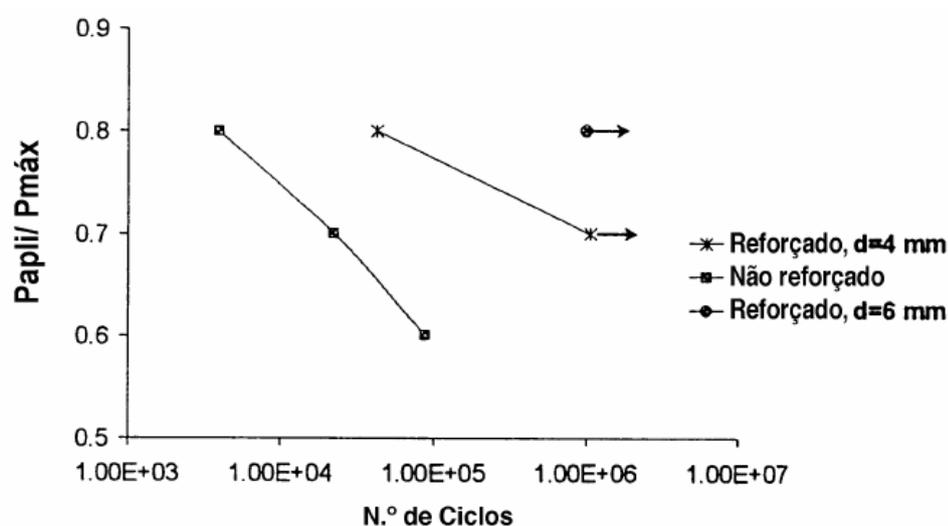


Figura 3.6 – Resultados dos ensaios de fadiga.

Tavares et al referenciam no mesmo artigo [31] ensaios realizados por Fowler que mostraram que a tensão aplicada é o factor mais importante que influencia a vida à fadiga de vigas em betão polimérico. Quando a tensão aplicada aumenta, a vida à fadiga diminui e o intervalo entre as tensões máxima e mínima (amplitude de tensão) tem, também, um efeito significativo.

A.J.M Ferreira [32] referencia McBarkia e Ahmed que efectuaram ensaios de fadiga por flexão em quatro pontos, para diferentes níveis de tensão (entre 50% e 80% do valor da carga de rotura ou carga máxima) em vigas feitas de betão polimérico à base de estireno (35% em peso) e de poliéster insaturado (65% em peso), areia, promotor e iniciador, aditivos e tratamento com agente acoplante de silano. Os ensaios foram realizados numa máquina Instron com controlo de carga, onda sinusoidal simples, com uma frequência

de 1 ciclo/s para os maiores níveis de tensão e de 5 ciclos/s para níveis baixos de tensão. As amostras foram curadas à temperatura ambiente durante 1 dia e depois a 75°C durante outro dia.

Neste estudo foram construídas as curvas (S – N), tensão - número de ciclos, e concluiu-se que:

- A deformação à fractura por fadiga em vigas com e sem reforço em fibras de vidro é independente do nível de tensão aplicado e tem um valor médio de 0.16%;
- A deformação aumenta rapidamente com o número de ciclos (10% da vida à fadiga e até 90%) e um aumento uniforme acima dos 90%;
- O reforço melhora a resistência à fadiga em flexão, sendo esta estimada em 60% a 2 milhões de ciclos.

Gorninski et al [33] estudaram o módulo de elasticidade e a resistência à compressão do betão polimérico produzido com dois tipos de resina de polyester e diversas concentrações de cinza volante.

Os resultados demonstraram que o betão polimérico possui uma grande resistência à compressão e que a concentração de cinza volante a afecta. Foi observado que maiores concentrações de cinza volante aumentaram a resistência do betão polimérico (Figura 3.7) pois devido à forma esférica regular da cinza volante, ocorre um melhor arrumo da mistura agregado-cinza volante, aumentando assim a resistência.

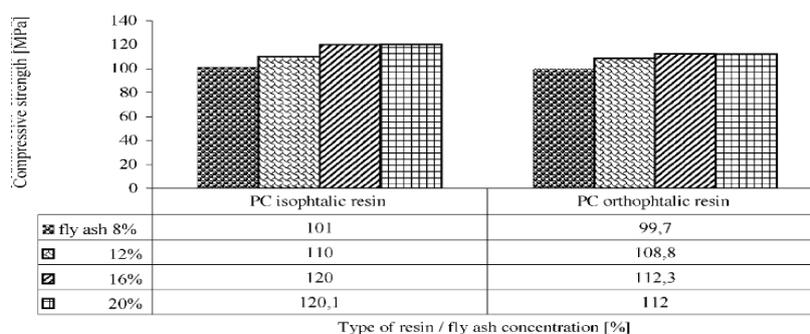


Figura 3.7 – Efeito do tipo de resina e concentração de cinza volante na resistência à compressão axial [33].

O estudo do módulo de elasticidade do betão polimérico permitiu concluir que este tende a aumentar à medida que as concentrações de cinza volante também aumentam, provavelmente devido ao aumento de rigidez do betão polimérico devido ao aumento de concentração de cinza volante.

Y.K. Jo [34] testou o efeito da presença de endurecedor em resinas epoxídicas presentes em vigas de betão polimérico. O autor executou provetes de 40 x 40 x 160 cm de argamassas poliméricas à base de resina epoxídica com e sem endurecedor e, depois de curados, os provetes foram expostos a ambientes exteriores e interiores durante um ano. Os provetes depois de expostos ao ambiente exterior foram armazenados a 20°C a 50% de humidade relativa por 7 dias para condicionamento. O local de exposição interior tratou-se de uma sala controlada a uma condição de 20 °C e 50% de humidade relativa. Após as exposições interiores e exteriores foram feitos diversos testes tais como mudanças de peso, resistência à flexão e compressão, absorção de água, carbonatação e distribuição de dimensões de poros.

O teste absorção de água consistiu em secar os provetes a 80°C até se obter um peso constante e posteriormente imersos em água a 20°C por 48h; o teste da carbonatação consistiu em pulverizar os provetes com uma solução alcoólica de fenofteína 1,0%.

Como resultado do estudo experimental, tiraram-se as seguintes conclusões:

- A mudança de peso das argamassas poliméricas de epoxy sem endurecedor após a exposição exterior teve uma tendência para diminuir com o aumento do quociente polímero-cimento. A perda de peso foi maior relativamente aos provetes expostos ao ambiente interior e foi menor relativamente aos provetes com endurecedor.
- A resistência à compressão e flexão das argamassas poliméricas sem endurecedor aumentou com o aumento do rácio polímero-cimento. A máxima resistência à flexão e à compressão dos provetes sem endurecedor expostos às condições exterior foram maiores do que os provetes sem endurecedor.
- A absorção de água dos provetes sem endurecedor foi menor do que os provetes com endurecedor.

- A carbonatação dos provetes sem endurecedor foi consideravelmente menor relativamente aos provetes com endurecedor.
- O volume total de poros dos provetes diminuiu com o aumento do rácio polímero-cimento.

### **3.2 EFEITO DA PRESENÇA DE AGREGADOS LEVES NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS**

M.C. Bignozzi et al [35] estudaram o efeito da presença de desperdícios poliméricos em argamassas poliméricas. O tipo de resina utilizada foi a de polyester, que foi misturada com areia, carbonato de cálcio e a diversos produtos de reciclagem, tais como borracha de pneus, desperdícios de cabos eléctricos e borracha pulverizada.

O estudo permitiu concluir que a resistência à compressão e flexão dos provetes com os desperdícios orgânicos são menores do que sem os desperdícios, porém, continuam maiores comparativamente ao betão de cimento Portland. No entanto, a adição dos desperdícios orgânicos aumentou a porosidade das amostras, particularmente nas interfaces entre a matriz da resina e os grãos de filler.

Também se observou que presença dos desperdícios orgânicos levou a uma condutividade eléctrica maior comparativamente aos provetes sem os desperdícios.

Nóvoa et al [36] retiraram conclusões acerca do comportamento de argamassas poliméricas modificadas com grãos de cortiça. Os resultados obtidos mostraram uma expectativa bastante interessante nos termos de encontrar uma argamassa polimérica mais leve, com uma maior ductilidade. As argamassas poliméricas foram preparadas misturando uma resina epoxídica, uma areia siliciosa com uma granulometria uniforme e cortiça granulada (Figura 3.8). Foram estudados duas séries de argamassa com diferentes proporções resina/areia. Em cada série, a areia foi parcialmente substituída por volumes de cortiça equivalentes, abrangendo dos 0% aos 45% de volume de agregado.



Figura 3.8 – Alguns exemplos de provetes cilíndricos e prismáticos produzidos de betão polimérico modificado com cortiça [36].

Os autores concluíram que tanto a resistência à compressão como a resistência à flexão diminui com a adição de grãos de cortiça (Figura 3.9), concluindo-se assim que o comportamento mecânico é afectado pela cortiça, que aumenta ao longo de cada série de testes, devido ao facto de o material se tornar mais dúctil, particularmente à compressão.

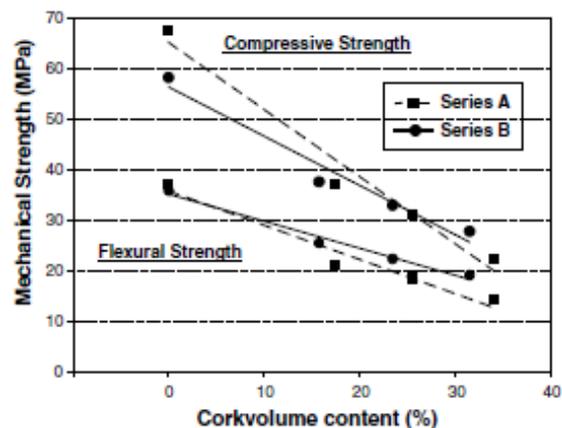


Figura 3.9 – Resistência à compressão e à flexão de ambas as séries de formulações de argamassa polimérica em função da quantidade de cortiça [36].

Os ensaios também mostraram que com maior proporção ligante/areia, a argamassa será menos afectada pela adição de grãos de cortiça e que a diminuição do volume relativo de resina ao longo de cada série de testes e a baixa resistência da cortiça são os principais factores responsáveis pela perda de propriedades observada.

Comparativamente aos materiais de cimento convencionais, o módulo de elasticidade da argamassa polimérica de cortiça é mais baixo, diminuindo com a quantidade de cortiça (Figura 3.10), mas a proporção resistência à flexão/compressão é bastante mais alto.

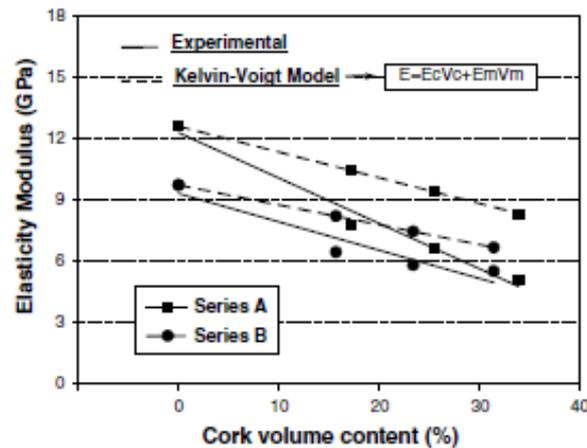


Figura 3.10 – Módulo de elasticidade previsto e experimental de ambas as séries de formulações de argamassa polimérica em função da quantidade de cortiça [36].

Estudos recentes sobre cinzas volantes como filler em argamassas epoxídicas sugerem que estas podem substituir o filler em quartzo apresentando melhores propriedades mecânicas. K. T. Varughese e B. K. Chaturvedi [37] elaboraram um estudo sobre o uso de cinza volante como filler em betão à base de resina polyester. Para tal, moldaram provetes com diferentes proporções cinza volante/areia e com diferentes quantidades de resina e estudaram o efeito da cinza volante, assim como da sua concentração, na sua resistência, absorção de água e tempo de cura.

Em relação ao tempo de cura, observou-se que maior quantidade de cinza volante leva a tempos de cura inferiores (Figura 3.11), pelo que se conclui que a polimerização de monómero de estireno e as ligações cruzadas entre as cadeias de polyester betão polimérico são activados pela presença da cinza volante, que se trata de uma mistura complexa de substâncias inorgânicas. Observou-se também que a o ligante em resina é o componente que executa o processo de endurecimento na presença de iniciador e acelerador. O facto de que o tempo cura da mistura 1 2 4 (maior % de resina) mistura é menor do que o da mistura 1 3 6 (menor % de resina) mostra que um aumento na quantidade do ligante de resina diminui o tempo de cura de misturas de betão polimérico.

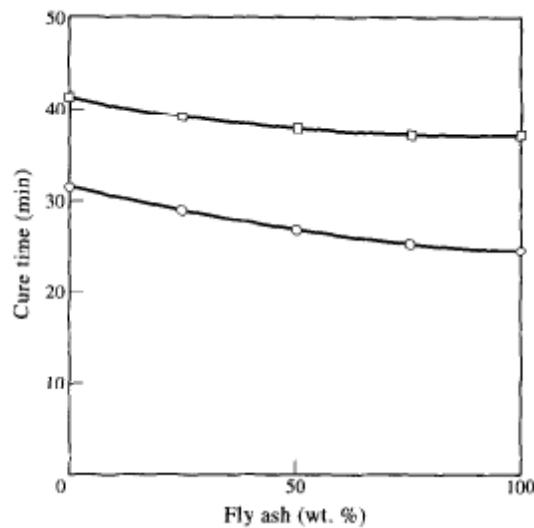


Figura 3.11 – Efeito da cinza volante no tempo de cura das misturas 1 2 4 (o) e 1 3 6 (□) [37].

Relativamente à resistência mecânica, observou-se [37] que o aumento de cinza volante até aos 75% levou a um aumento da resistência à flexão do material (Figura 3.12), diminuindo nos valores superiores a esta percentagem devido ao facto de em concentrações superiores a 75% a mistura torna-se não trabalhável, o que torna as ligações entre o ligante em resina e as partículas de cinza volante mais fracas. Observou-se também que o aumento de concentração de resina levou a um aumento de resistência.

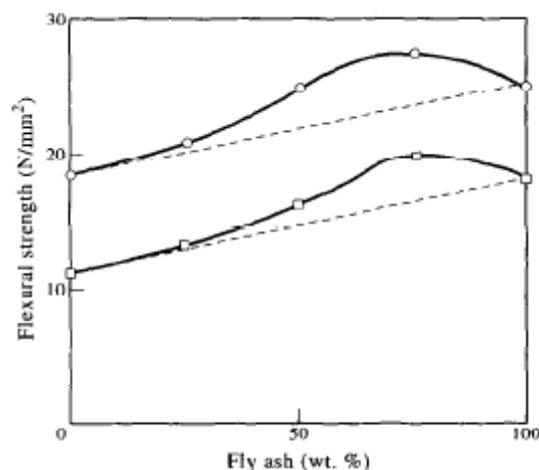


Figura 3.12 – Efeito da cinza volante na resistência à flexão das misturas 1 2 4 (o) e 1 3 6 (□) [37].

Em relação à absorção de água, foi observado neste estudo que maiores concentrações de cinza volante levam à redução da absorção de água (Figura 3.13), facto observado até aos 75% em cinza volante, concentração a partir da qual se nota novamente um aumento na água absorvida, também devido ao facto das ligações entre a cinza volante e a resina enfraquecerem a partir desta concentração. Observou-se também que maior quantidade de resina leva a uma diminuição na quantidade de água absorvida da mistura

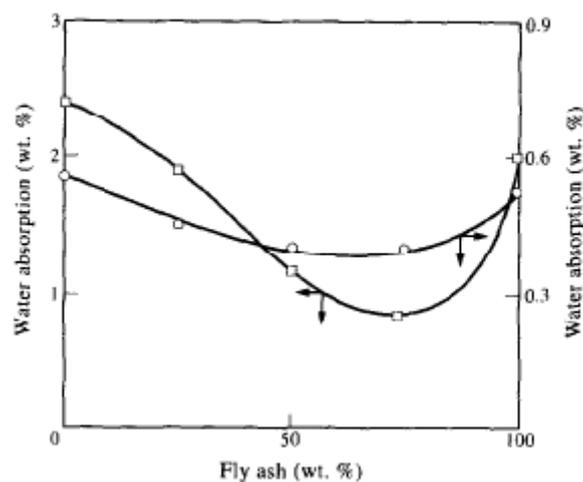


Figura 3.13 – Efeito da cinza volante na absorção de água das misturas 1 2 4 (o) e 1 3 6 (□) [37].

Rossignolo e Agnesini [38] retrataram as propriedades de betão polimérico modificado com látex. Para o efeito, moldaram provetes cilíndricos e testaram a sua resistência à compressão e a sua capacidade de absorção de água.

O teste da absorção de água consistiu em secar os provetes num forno a 105 °C por 24 h e seguidamente imergidos em água a 23 °C. Os provetes foram então retirados da água e pesados em vários períodos por 72 h.

Os autores [38] concluíram que o betão polimérico modificado com látex é um material muito coesivo e trabalhável mostrando uma trabalhabilidade muito boa 1 hora após da conclusão da mistura. Observou-se também que a inclusão de látex diminuiu significativamente a quantidade de água nos provetes. A resistência à compressão dos provetes modificados com látex mostrou ser um pouco menor comparativamente aos provetes sem a inclusão do látex; este facto poderá ser devido ao aumento da quantidade

de ar dos provetes com látex. Houve também um aumento significativo de absorção de água dos provetes com inclusão de látex, notando-se que quanto menos látex tinham, menos água foi absorvida.

Silva et al [39] estudaram os efeitos de agregados leves naturais tais como a vermiculite e perlite nas propriedades do betão polimérico. O estudo permitiu concluir que a incorporação dos agregados leves provoca reduções relevantes nas características mecânicas do produto. Entre estas características afectadas encontra-se a porosidade e a resistência à compressão. À semelhança de outros estudos, estes observaram que maior percentagem de agregados leva a um aumento da porosidade e uma diminuição da resistência à compressão e à flexão. O aumento em excesso da concentração de agregados leves como a perlite e a vermiculite pode formar betão polimérico sem interesse prático devido à falta de coesão. Por outro lado, argamassas com concentração óptima de agregado podem formar um bom material para reabilitação ou paredes de edifícios feitas com suportes fracos.

Srivastava e Shembekar [40] avaliaram o efeito da adição de cinza volante à resina de epoxídica. Para o efeito, adicionaram várias concentrações de cinza-volante à resina. Os autores concluíram que o módulo de elasticidade a energia na superfície de fractura e o comportamento à fractura da resina de epoxídica pode ser melhorada com a adição das partículas de cinza-volante devido ao facto da parte da frente da fractura interagir com as partículas de cinza-volante o que melhora as propriedades da fractura.

McEwan et al [41] realizaram um estudo acerca da influência da presença de borracha em resinas epoxídicas. Os investigadores utilizaram várias concentrações de borracha, que variaram dos 0 aos 40% e imergiram os provetes em água destilada a 298K.

Posteriormente, fizeram uma análise dieléctrica à água absorvida, executada a uma frequência variável entre  $10^{-3}$  e  $10^5$  Hz durante um período de 2 semanas a 298 K. A análise dieléctrica reflecte a permitividade e perda associada com o movimento da água na matriz, sendo que nas resinas epoxídicas a água se liga quase exclusivamente aos grupos hidróxidos produzidos no processo de cura.

O estudo [41] demonstrou que o aumento da quantidade de borracha tem o efeito de aumentar a quantidade de absorção de água do sistema (Figura 3.14). A análise

dielétrica da água absorvida mostrou que apesar da adição de borracha aumentar a quantidade de água no sistema de resina, a quantidade de água livre é drasticamente reduzida.

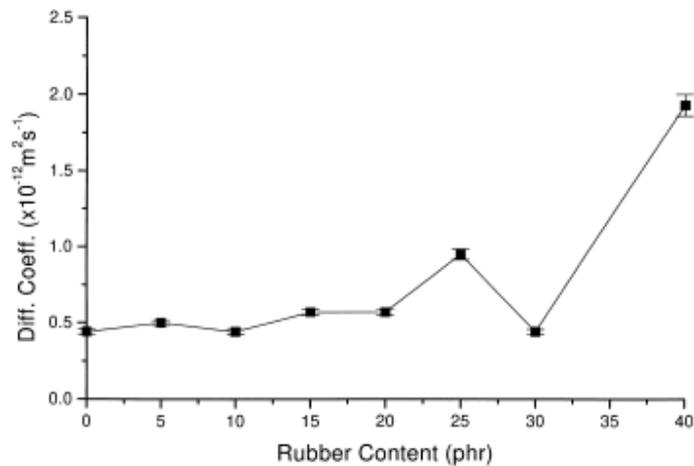


Figura 3.14 – Coeficientes de difusão gravimétrica para diferentes quantidades de borracha [41].

### 3.3 COMPORTAMENTO FACE A AGENTES AMBIENTAIS E QUÍMICOS

#### 3.3.1 RESISTÊNCIA À TEMPERATURA, NEVOEIRO SALINO, HUMIDADE

Reis e Ferreira [42] estudaram o efeito da exposição marinha em betão polimérico. Para o efeito, colocaram os provetes num telhado de uma casa perto de Aveiro, perto do mar. A deterioração do material e performance estrutural foram investigadas numa situação real de exposição em dois períodos diferentes do ano, Primavera/Verão e Outono/Inverno (Figura 3.15). Foram usados betões com resina epoxídica pura e reforçada com fibra de vidro e de carbono.

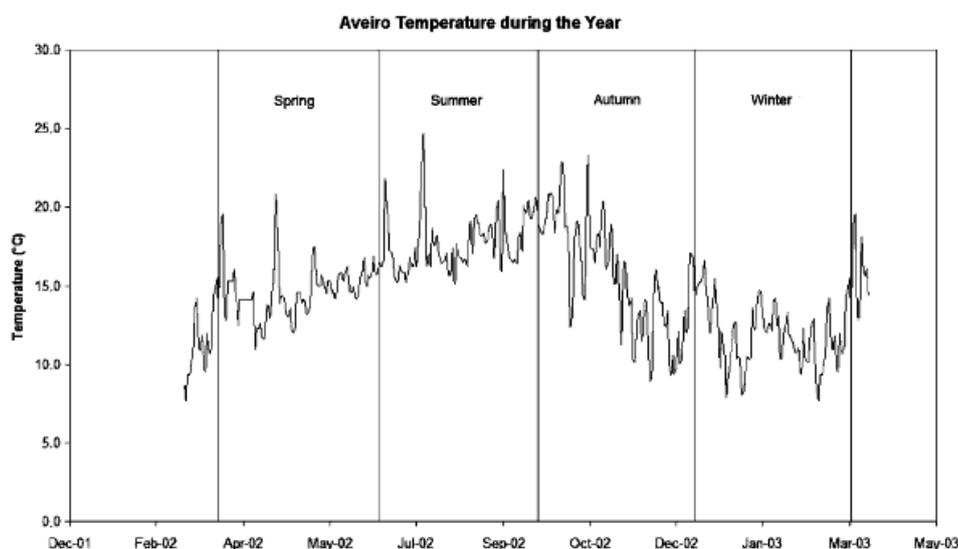
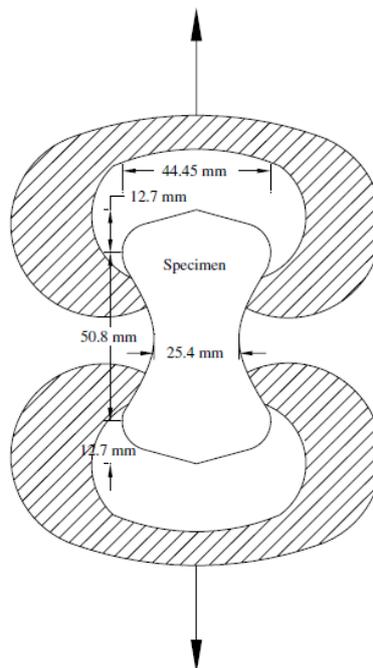


Figura 3.15 – Temperatura de Aveiro durante o ano de estudo.

Os autores concluíram que o período de exposição Primavera/Verão é o mais agressivo para os betões poliméricos, devido principalmente à temperatura e radiação Ultra-Violeta. Observou-se também que o reforço com fibra de vidro apresenta melhores propriedades que o reforço com fibra de carbono, o que pode ser explicado pela maior sensibilidade da fibra de carbono às radiações UV.

Mahdi et al. [43] utilizaram desperdícios de garrafas de polietileno tereftalato (PET) tais como as garrafas de água e de outras bebidas, para produzir resina de polyester insaturada por despolimerização através da reacção de glicólise com dietilenoglicol. A glicólise foi otimizada através da variação de temperatura, quantidade de catalisador, e tempo de glicólise. Os monómeros produtos da glicólise bis-2-tereftalato de etileno hidroxi (BHET) foram convertidos em poliésteres insaturados, os quais foram diluídos em estireno para produzir a resina de poliéster insaturado. Estas resinas foram usadas para produzir argamassa de polímeros e curados com peróxido de benzoíla como iniciador e N, N-dietil anilina como promotor. Foram analisadas as propriedades físico-químicas destes compósitos de argamassa polimérica utilizando carbono, hidrogénio e nitrogénio (CHN) análise elementar, infravermelho com transformada de Fourierespectroscopia (FTIR), análise termogravimétrica e análise térmica diferencial (TGA-DTA).

A resistência à compressão e à tracção da argamassa polimérica com percentagens variáveis resina (10%, 15% e 20%) por peso de areia foi determinada ao fim de 15, 30 e 45 dias. A resistência à compressão foi determinada por meio de cubos com dimensões de 70,7 mm e resistência à tracção foi determinada através do teste de briquete. Mostra-se na Figura 3.16 um briquete durante testes de tracção. Os cubos ensaiados à compressão não desenvolveram fissuras verticais. As fissuras não passam pelo agregado, mas causa falha de ligação entre o agregado e a resina.



*Figura 3.16 - Briquete de argamassa polimérica durante o teste de tracção [43].*

Os autores [43] verificaram que, ao longo do tempo tanto a resistência à tracção como à compressão aumentou; observaram também que quanto maior era a percentagem de resina (Figura 3.17), maiores eram os valores da resistência da argamassa polimérica. A resistência da argamassa à tracção aos 45 dias de idade foi de 18-23% da sua resistência à compressão com a mesma idade. A resistência à compressão aos 15 dias foi cerca de 60% da sua resistência aos 45 dias, tendo os autores concluído que o tempo de cura de compósitos de polímeros pode ser tomado como 15 dias.

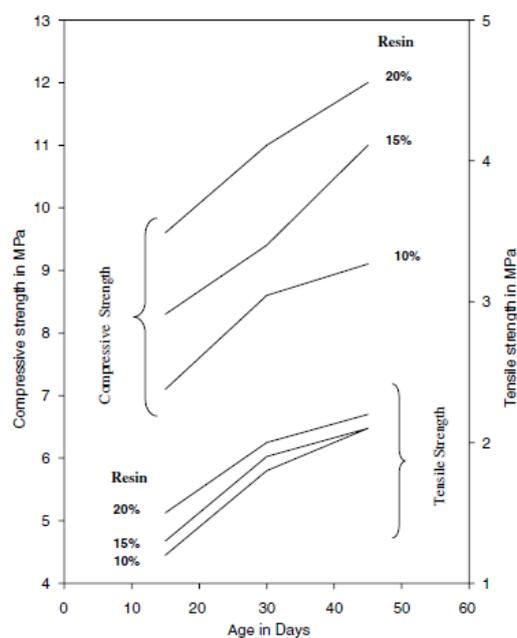


Figura 3.17 – Variação da resistência à Flexão e Compressão com o tempo [43].

Para o estudo do efeito da temperatura [43], os fillers (cascalho, areia e cinzas volantes) e utensílios de mistura foram colocados numa câmara ambiental a uma determinada temperatura durante 48 h antes da mistura. Após a mistura, os provetes foram novamente colocadas numa câmara ambiental à temperatura designada por um período de 28 dias antes dos ensaios. As temperaturas seleccionadas foram de  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$  e  $60^{\circ}\text{C}$ . O ensaio, realizado à temperatura ambiente, foi realizado imediatamente após a remoção dos provetes da câmara ambiental.

Verificou-se neste estudo [43] que um aumento da temperatura produziu uma perda de resistência do betão polimérico devido à perda resultante de força do ligante de resina e consequente diminuição de da força de ligação entre os agregados e o ligante inorgânico de resina. Verificou-se que à temperatura negativa, não houve perda significativa de resistência dos provetes, enquanto que um aumento na temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$  e  $60^{\circ}\text{C}$  diminuiu a resistência à compressão em cerca de 40%. O betão polimérico é muito mais sensível às altas temperaturas que o betão de cimento Portland porque o sintético viscoelástico aglutinante de resina usado na produção de betão polimérico é mais sensível à temperatura que o ligante inorgânico de cimento utilizado na produção de betão de cimento Portland. Contudo, Apesar desta perda de resistência a altas

temperaturas, o betão polimérico continua a ser, pelo menos, duas vezes mais resistente em compressão e especialmente na flexão como o betão de cimento Portland.

Manuel A. G. Silva e Zenaide C. G. Silva [44] testaram betão polimérico à base de resinas epoxídicas e polyester à difusão, humidade, temperatura, nevoeiro salino e radiação ultravioleta. O ensaio para avaliar a difusão foi feito imergindo os provetes em água destilada e em água salgada a 18°C após terem sido secos numa câmara a 40°C até a sua massa estabilizar. Posteriormente, os provetes foram pesados em intervalos de tempo regulares para avaliar o seu ganho em massa. Para os ciclos de humidade a temperatura fixa, os provetes foram mantidos numa câmara e foram sujeitos a uma sequência contínua de ciclos, cada um com 12 horas a 20% de humidade relativa seguido de 12 horas a 90% de humidade relativa. Os provetes foram retirados às 1000, 3000, 5000 e 10.000 horas.

Neste estudo [44] o envelhecimento devido aos ciclos térmicos foi imposto mantendo a humidade relativa da câmara a 80% enquanto que a temperatura mudava a cada 12 horas de 20°C para 50°C. Foi igualmente estudado o efeito das temperaturas negativas sobre o material.

Para os ciclos de nevoeiro salino, os provetes foram submetidos a salinidade fornecida por 50 g de NaCl por litro de água ou seja, aproximadamente o dobro da salinidade do mar durante 8h a 98% de humidade, seguido de 16 horas de secagem a uma temperatura de 35 °C, de modo a acelerar a visibilidade dos efeitos.

De modo a observar o efeito da radiação ultra violeta nos provetes, estes foram submetidos a raios filtrados de ar xénon atingindo uma radiação média de 550 w/m<sup>2</sup> por um período de 3000 horas.

Os autores [44] concluíram que comparativamente, as acções de ambientes acelerados tiveram um efeito mais adverso para a argamassa epoxídica que para a argamassa de polyester, tendo-se verificado que para as misturas usadas, os valores de difusão são maiores para a argamassa de polyester e que a saturação dos prismas devido à imersão é atingido a valores inferiores de massa ganha em água salgada do que em água destilada (Figura 3.18).

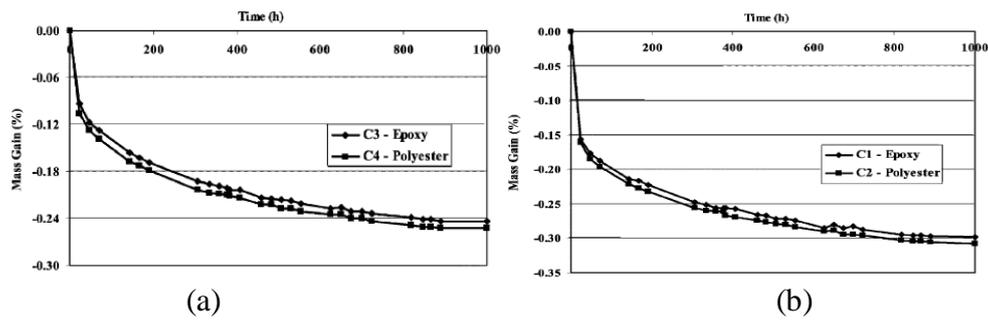


Figura 3.18 – Curvas de perda de massa (%) para ambas as argamassas após saturação: (a) água salgada; e (b) água destilada [44].

Neste estudo [44], os ensaios de ciclos de humidade permitiram observar uma diminuição substancial de resistência à flexão (Figura 3.20 a)) da argamassa epoxídica após ciclos de humidade tendo a sua flecha última média quase dobrado. Em relação aos provetes com resina de polyester, estes mostraram uma variação irregular da sua resistência á flexão, seguida de uma diminuição de resistência, sendo os efeitos na resistência à flexão muito menos visíveis na argamassa de polyester, comparando com a resina epoxídica. Relativamente à resistência à compressão (Figura 3.20 b)), ambas as resinas mostraram o mesmo tipo de comportamento.

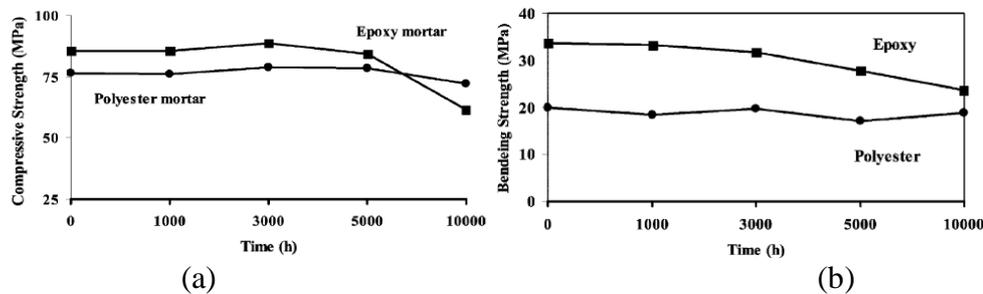


Figura 3.19 - Efeito dos ciclos de humidade na resistência das argamassas (a) flexão; e (b) compressão [44].

Os autores [44] observaram que os ciclos térmicos afectam a resistência das argamassas, notando-se uma redução elevada na resistência à flexão (Figura 3.20) no final dos ciclos. Os ciclos térmicos afectaram também assim a sua textura, causando coalescência dos poros, especialmente na argamassa epoxídica. Para temperaturas negativas, a resistência das argamassas aumenta à medida que a temperatura diminui.

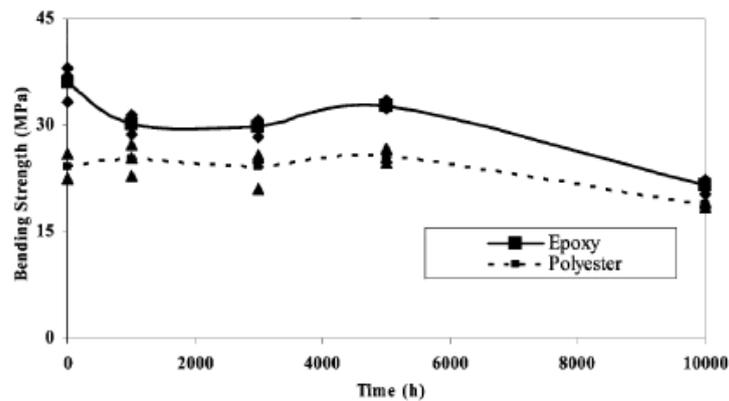


Figura 3.20 - Flexão última – Efeito dos ciclos de temperatura [44].

Os ciclos de nevoeiro salino causaram os efeitos mais severos na resistência dos materiais, especialmente na resina epoxídica causando a redução mais drástica na resistência à flexão dos provetes (Figura 3.21)

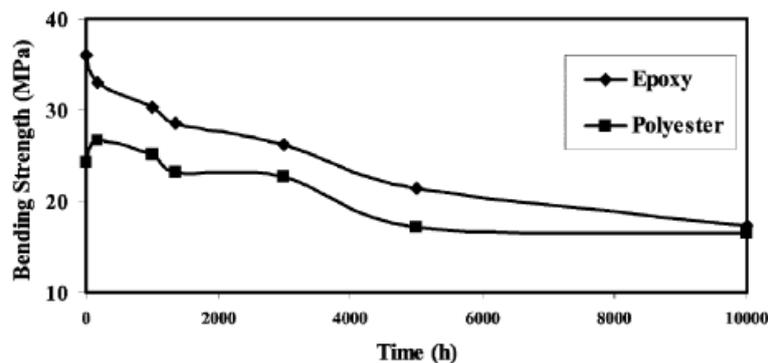


Figura 3.21 – Efeito dos ciclos de nevoeiro salino na resistência à flexão última [44].

Neste estudo [44], a observação macroscópica mostra que a argamassa epoxídica apresenta poros de contornos cada vez mais intensos à medida que os ciclos de nevoeiro salino prosseguem até às 1000 horas, praticamente desaparecendo às 5000 horas e voltando a ser novamente bastante distintos às 10.000 horas.

A observação ao microscópio electrónico mostrou a evolução da fronteira entre a matriz e os poros assim como o diferente arredondamento dos poros (Figura 3.22) à medida que os ciclos de nevoeiro salino avançam.

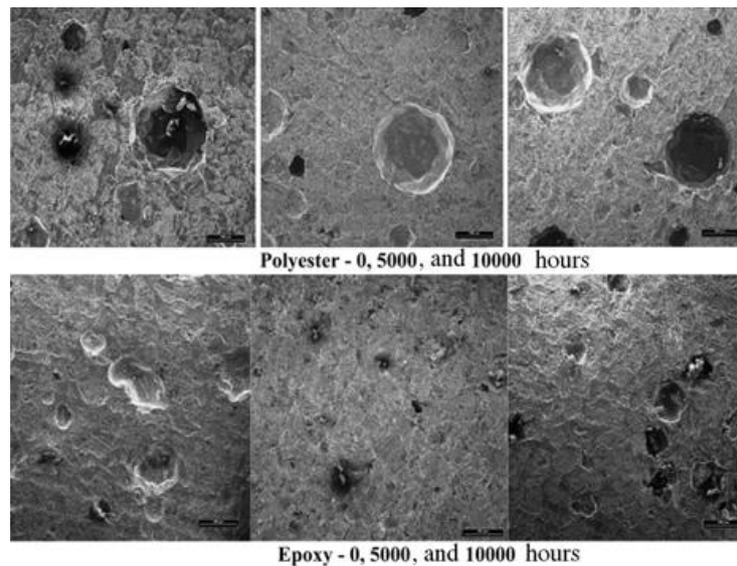


Figura 3.22 – Imagens SEM das argamassas de polyester e de epoxy após os ciclos de nevoeiro salino [44].

A radiação ultravioleta [44] causou diferença na cor da superfície exposta (Figura 3.23) e aumentou a permeabilidade superficial, o que causa uma maior absorção de humidade, indicando que o efeito da radiação ultra violeta não pode ser negligenciado. Não se verificaram grandes diferenças na de resistência e, de facto, as diferenças contribuíram para uma resistência maior, provavelmente devido a uma cura posterior da resina e ao envelhecimento natural dos prismas.

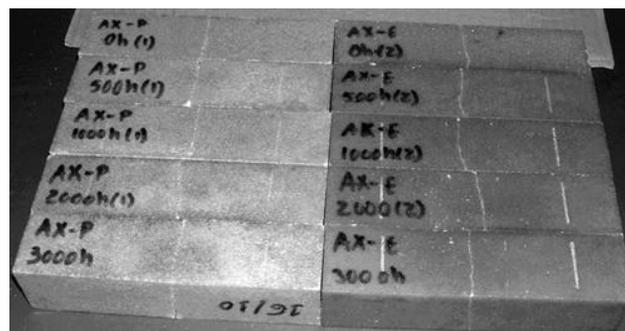


Figura 3.23 – Aspecto dos provetes de polyester e epoxy após a submissão à radiação solar [44].

H. Toutanji e P. Balaguru [45] efectuaram um estudo da durabilidade de betão polimérico reforçado com diferentes tipos de fibra (C1, C5 e GE). Para o efeito, dividiram provetes cilíndricos de dimensões 76 x 305 mm em dois grupos de ambientes

diferentes. Os provetes do primeiro grupo não foram sujeitos a nenhuma condição ambiental e foram deixados à temperatura ambiente durante 75 dias. Os provetes do segundo grupo foram colocados numa câmara ambiental e foram expostos a 300 ciclos de molhagem e secagem em ambiente salino a uma temperatura de 35 °C e com humidade relativa de 90%. A água do mar foi simulada usando 35g de sal para 1litro de água que é a quantidade aproximada de sal que se encontra no mar. A duração do ciclo molhado foi de 4h e o do ciclo seco foi de 2h.

Os resultados deste estudo [45] mostraram que os ciclos de molhagem e secagem tiveram pouco efeito na resistência à compressão dos provetes, reduzindo apenas em cerca de 10% no entanto, a sua rigidez permaneceu praticamente inalterada (Tabela 3.1).

*Tabela 3.1 – Resultados experimentais dos provetes condicionados e não condicionados, adaptado de [45].*

Provete	Temperatura Ambiente		Molhagem-Secagem	
	f'c (MPa)	εs (%)	f'c (MPa)	εs (%)
Controlo	31,8	0,2	38,2	0,13
CGE	63,2	1,43	57,2	1,41
CC1	98,7	1,79	94,6	1,56
CC5	96	1,6	91,8	1,48

Pardo et al. [46] compararam a influência da temperatura na resistência mecânica de três betões poliméricos diferentes após os condicionar a diferentes temperaturas, que iam dos 20 aos 200 °C. Os resultados mostraram que os provetes testados à temperatura ambiente não apresentaram nenhuma redução de resistência significativa enquanto, quando testados a temperaturas maiores, descobriu-se uma descida significativa da resistência à flexão e à compressão.

Os mesmos autores [46] também analisaram o comportamento mecânico do betão polimérico após a exposição a 100 ciclos térmicos de fadiga. Foram desenvolvidos seis ciclos térmicos com diferentes temperaturas de 20, 40, 60, 80, 120, 140 e 160 °C, respectivamente para cada um dos ciclos. Após 100 ciclos, uma série de provetes foi testada a 20 °C enquanto a outra série foi testada à temperatura máxima do ciclo.

Concluiu-se que a fadiga térmica não afecta a resistência do betão polimérico, se este regressar às suas condições iniciais.

Nos últimos anos, verificou-se que algumas estruturas de betão, até mesmo para alguns betões de alto desempenho, começam a deteriorar-se muito antes de atingir sua vida útil projectada. São encontradas fendas após estrutura ter sido concluída há poucos anos, o que resulta na redução da vida útil e da durabilidade. Por isso, Reis e. Ferreira [47] estudaram a influência sobre as propriedades de fractura em betão polimérico de resina epoxídica reforçado com fibra ou vidro sujeitos a ciclos de gelo-degelo e de degradação térmica. Para o efeito, os autores submeteram os provetes a ciclos de gelo-degelo de 2 horas a +10°C seguido de 2 horas a -10°C assim como a ciclos de temperatura positiva que consistia em 2 horas a +100 °C seguido de 6 horas a +20 °C.

Os resultados deste estudo [47] demonstraram uma variação das propriedades do material com a temperatura. À medida que a temperatura dos ciclos de teste aumentou, a elasticidade à flexão diminui e o material tornou-se mais dúctil tornando os valores de rigidez à fractura mais elevados. Este aumento pode ser explicado pela mobilidade molecular das cadeias de polímero.

Ribeiro et al. [48] fizeram um estudo comparativo da influência dos efeitos da temperatura na resistência à flexão de argamassas poliméricas de polyester e epoxy. Para este propósito, foram moldados os diversos provetes que foram deixados a curar, à temperatura ambiente, e posteriormente foram curados a uma temperatura de 80 °C por 3 horas, antes de serem expostos às condições ambientais definidas.

Para determinar a influência da temperatura na resistência das argamassas poliméricas, os autores expuseram os provetes a temperaturas constantes e a ciclos térmicos de desgaste. Para o primeiro caso, dois tipos de estudo foram executados: uns provetes foram aquecidos ou arrefecidos numa câmara climática sendo imediatamente ensaiados à flexão, à temperatura respectiva e outros foram imersos em água, após saírem da câmara climática, sendo ensaiados à temperatura ambiente; Para o segundo caso, os provetes foram expostos a dois tipos de estudo: ciclos térmicos de temperaturas positivas, entre +20( durante 6 horas)e +100°C (durante 2 horas), e ciclos de arrefecimento-aquecimento com temperaturas entre os -10°C e os +10°C (ambas durante

2 horas), tendo havido provetes que foram aquecidos\arrefecidos pelo ar (ciclos secos) e outros provetes que foram congelados e descongelados pela água, para acelerar o processo de envelhecimento.

Os autores [48], com este estudo concluíram que as propriedades das argamassas epoxídicas de polyester são fortemente afectadas pela temperatura do ambiente pois, exceptuando para uma escala de temperatura limitada, a resistência à flexão dos provetes diminui drasticamente à medida que a temperatura aumenta (Figura 3.24); estes também observaram que as argamassas de epoxy são mais sensíveis à temperatura que as argamassas de polyester apesar de, para temperaturas abaixo dos +10°C, o comportamento das argamassas de epoxy melhorar com a diminuição da temperatura.

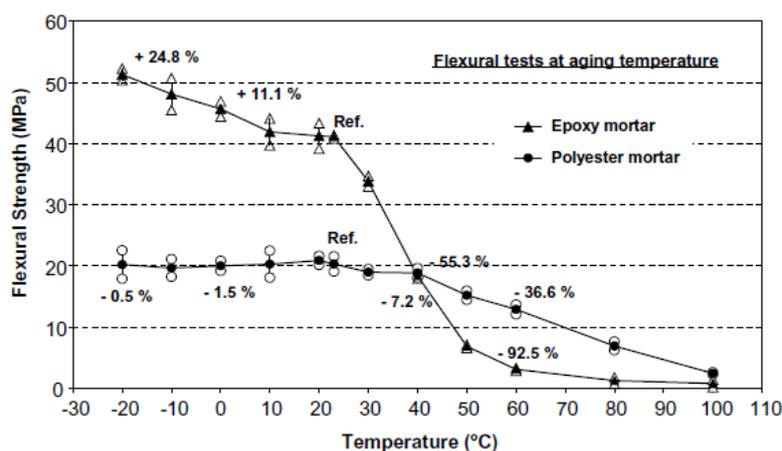


Figura 3.24 – Resistência à flexão das argamassas de epoxy e de polyester em função da temperatura de condicionamento [48].

Os resultados apresentados neste estudo [48] mostraram também que a exposição a temperaturas constantes não tem influência nas propriedades nas duas formulações de argamassas poliméricas desde que os provetes sejam levados novamente às suas condições ambientais iniciais. No entanto, a capacidade de recuperação das argamassas epoxídicas é gradualmente reduzida pela repetida exposição a temperaturas altas (Figura 3.25).

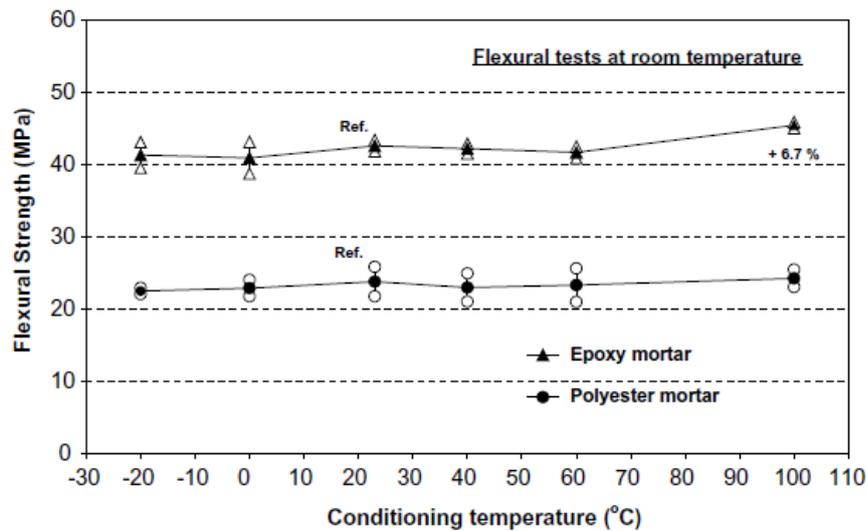


Figura 3.25 – Resistência à flexão das argamassas poliméricas de epoxy e polyester após regresso às condições iniciais, em função da temperatura [48].

Os ciclos térmicos de temperaturas positivas mostraram neste estudo [48] que a contínua exposição às altas temperaturas tem um efeito negativo na resistência à flexão, pois após 50 ciclos térmicos de fadiga, observou-se uma descida de 14% na resistência e de 75% aos 100 ciclos (Figura 3.26)

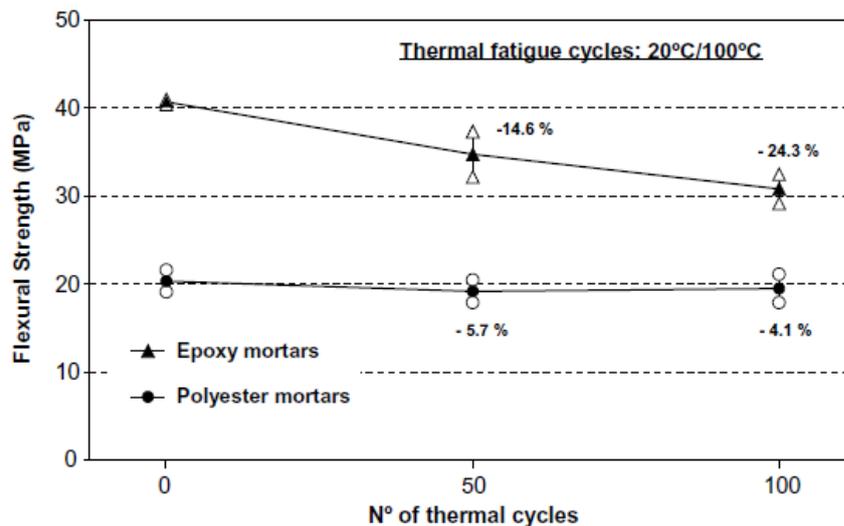


Figura 3.26 – Resistência à flexão residual das argamassas poliméricos de epoxy e polyester após exposição aos 50 e 100 ciclos térmicos positivos (20 °C/100 °C) [48].

Os autores [48] verificaram que os 100 ciclos de arrefecimento-aquecimento produzem muito pouco dano tanto nas argamassas de polyester como nas argamassas de epoxy, possivelmente devido a um reduzido grau de absorção de água (Figura 3.27).

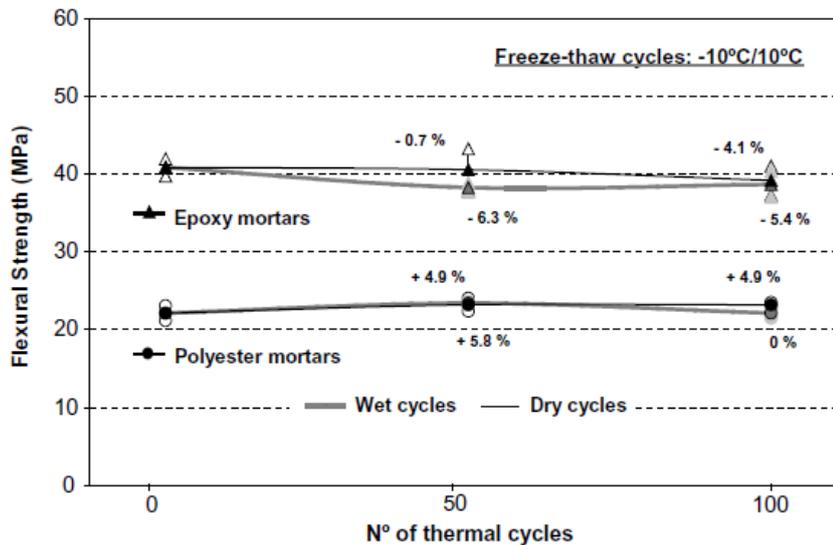


Figura 3.28– Resistência à flexão residual das argamassas poliméricas de epoxy e polyester após exposição aos 50 e 100 ciclos de gelo-degelo (ciclos molhados e ciclos secos [48]).

Todos estes resultados mostraram a relevância das propriedades do material com a temperatura, particularmente da argamassa polimérica de epoxy, concluindo-se que este material é deve ser utilizado a temperaturas ambientais mais baixas de modo a beneficiar de todo o seu potencial em resistência. No caso de temperaturas mais altas, o material deverá ser usado com precaução pois as suas propriedades poderão descer significativamente.

Aggarwal et al. [49] executaram provetes de betão modificado constituído por cimento Portland, areia e resina epoxídica em diferentes percentagens e testaram as suas propriedades. O método experimental consistiu em estudar o comportamento dos provetes relativamente à sua resistência, absorção de água e penetração de cloretos. Cinco provetes de 40 x 40 x 160 mm foram moldados para o teste de resistência à flexão. Depois do ensaio à flexão, os provetes foram ensaiados à compressão e à capacidade de absorção de água. Para o teste de penetração de cloretos foram moldados 3 prismas de dimensões 40x40x80 mm. Depois de moldados, os provetes foram

deixados a curar nos moldes por 24 horas. Durante este período os provetes foram cobertos por um pano molhado e um lençol de polietileno. Os provetes foram então mantidos em condições de laboratório,  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  de temperatura e  $50 \pm 5\%$  de humidade relativa nos 27 dias seguintes. As amostras curadas foram imersas numa solução de cloreto de sódio 2,5% a  $25^\circ\text{C}$  durante 7 dias. Os provetes foram cortados depois do testes e os cortes foram pulverizados por soluções de fluoresceína de sódio 0,1% e de nitrato de prata 0,1 N. A penetração de cloretos é então medida pela profundidade da mudança de cor para branco das amostras.

Os resultados deste estudo [49] mostraram que a adição de polímero à argamassa de cimento melhora a trabalhabilidade, aumenta a resistência à flexão e à compressão o que prova que a resina melhora a resistência da argamassa (Figura 3.28), sendo que o aumento de resistência é mais acentuado na resistência à flexão.

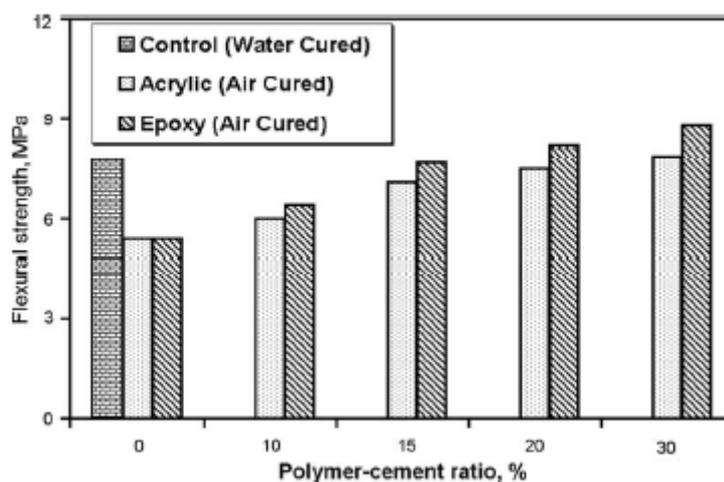


Figura 3.28 – Comparação da resistência à compressão aos 28 dias dos provetes de controlo e de betão polimérico com diferentes quocientes polímero – cimento [46].

Em relação à penetração de cloretos, observou-se que a adição de polímero diminuiu grandemente a taxa de carbonatação do material (Figura 3.29).

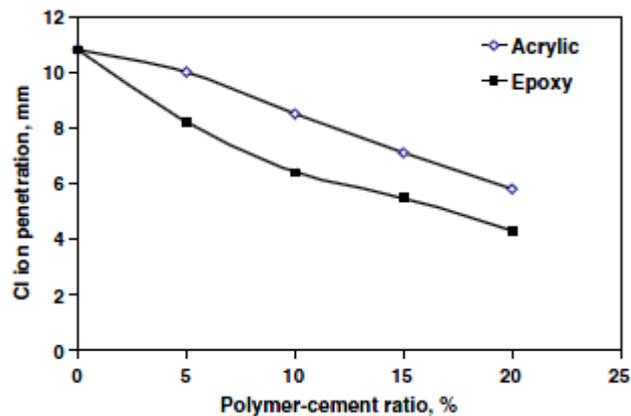


Figura 3.29 – Efeito da adição de polímero na taxa de carbonatação [49].

A taxa de absorção de água foi também avaliada neste estudo [49], observando-se que maior percentagem de polímero leva a uma redução da quantidade de água absorvida, e consequentemente da sua porosidade, concluindo-se que o polímero ocupa os poros na matriz de cimento (Figura 3.30).

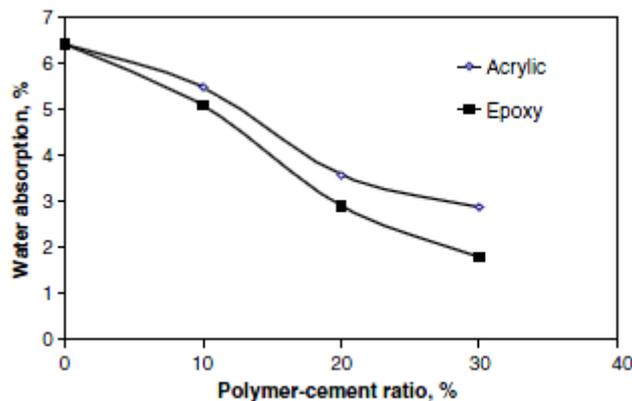


Figura 3.30 - Efeito da adição de polímero na absorção de água [49].

Desta forma, os autores [49] concluíram que a argamassa à base de resina epoxídica é um bom material para trabalhos de reparação em ambientes húmidos e industriais.

Shaker et al. [50] estudaram a os aspectos principais da durabilidade de betão polimérico à base de látex (LMC) comparando-o ao betão convencional (OPC). Para o teste de penetração de água, os autores usaram provetes prismáticos que foram submetidos a água a uma pressão especificada por um período de tempo fixo. A

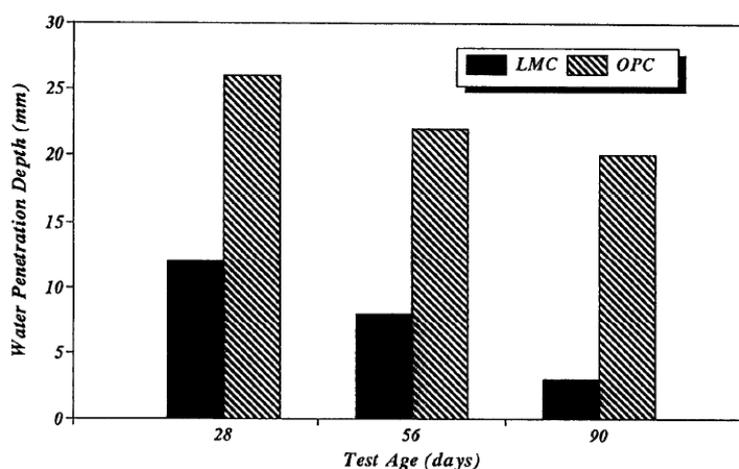
profundidade de penetração foi medida em vários pontos e foi registado um valor médio.

Neste estudo [50], o teste de absorção de água foi realizado em fatias betão de espessura 5 cm de um corte a meio de uma amostra cilíndrica de 10 cm de diâmetro. O teste de absorção foi realizado de acordo com a norma ASTM C462-90 (IO) e a percentagem de absorção foi calculada após 48 horas de imersão na água. O teste de absorção requer os provetes secos, sendo o processo de secagem realizado numa estufa à temperatura de 105 ° C até o peso dos provetes ficar constante.

O teste de abrasão foi realizado usando uma máquina de teste à abrasão com disco rotativo. Este ensaio determina a resistência à abrasão medindo a massa e a perda de massa devido à abrasão. O teste de resistência aos sulfatos consistiu em imergir os provetes numa solução de Sulfato de Sódio 5% em diferentes intervalos de tempo até aos 28 dias, sendo de seguida ensaiados à compressão.

Os autores [50] também observaram os provetes ao microscópio electrónico, observando que o betão polimérico de látex possui uma microestrutura mais densa comparativamente ao betão convencional. Observou-se também que o betão com polímero possui poros muito mais pequenos que os do betão convencional e que não existem deposição de cristais nem microfendas no interior dos poros. Estas características reduzem a penetração de fluidos e aumenta o desempenho em termos de durabilidade.

O teste de absorção de água realizado neste estudo [50] permitiu observar que a taxa de absorção de água do betão com polímero é inferior à do betão convencional, facto observado para todas as idades de ensaio. A redução da taxa absorção de água ao longo do tempo para o LMC foi de 75% enquanto que para o betão convencional foi apenas de 23% (Figura 3.31).



*Figura 3.31 – Penetração de água a diferentes idades de teste para betão polimérico (LMC) e betão convencional (OPC) [50].*

No teste de abrasão [50], o betão com látex mostrou uma maior resistência à abrasão que o betão convencional (Tabela 3.2). Tanto para a perda de massa como a de dimensões, o LMC demonstrou sempre menos perda em cerca de metade, comparando com o betão convencional.

*Tabela 3.2 – Perda de dimensões e de peso (%) em diferentes betões poliméricos (LMC) e convencionais, adaptado de [47].*

Material	Perda de Dimensões %			Perda de Massa %		
	28 dias	56 dias	10 dias	28 dias	56 dias	10 dias
LMC	14	13	10	1,6	1,4	1
Betão Convencional	24	24	20	2,5	2,3	1,9

No teste de resistência aos sulfatos [50] o betão com látex mostrou uma diminuição menor, em cerca de 30%, na resistência à compressão após os diferentes períodos de imersão na solução de sulfato quando comparado com o betão convencional (Figura 3.32).

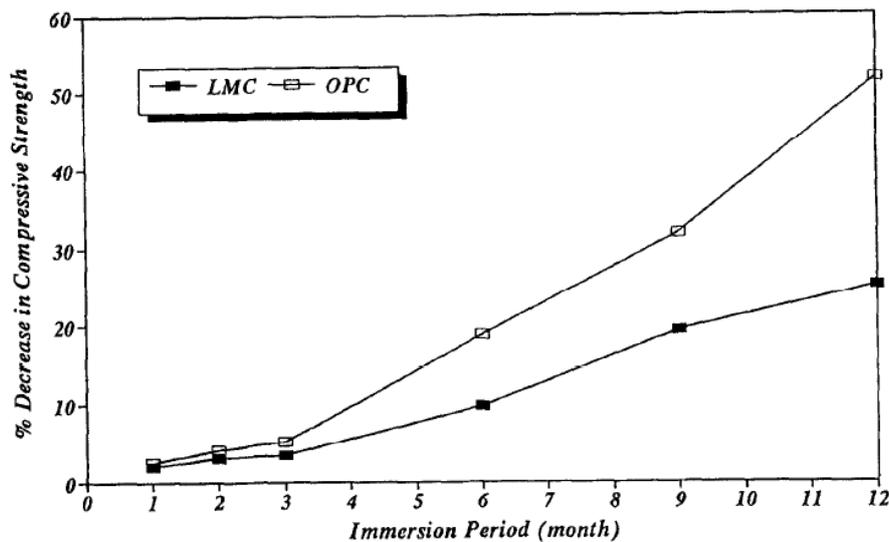


Figura 3.32 – Perda em resistência em resistência à compressão após diferentes períodos de imersão para o betão polimérico (LMC) e betão convencional (OPC) [50].

El-Hawary et al. [51] investigaram o efeito da temperatura no comportamento mecânico do betão polimérico. Foram usadas três tipos de resinas, duas epoxídicas e uma de polyester, com diferentes percentagens (9, 12 e 15%). O ensaio consistiu em colocar os provetes num forno durante 6h a temperaturas de 100, 150 e 200 °C, tendo sido posteriormente deixados a arrefecer à temperatura ambiente antes de serem ensaiados à compressão. Verificou-se que o aumento de temperatura levou a um aumento da resistência à compressão, devido ao endurecimento do polímero devido à temperatura. Concluiu-se também que maior quantidade de polímero, maior foi o aumento de resistência dos provetes. Notou-se também um baixo módulo de elasticidade para todos os casos, provavelmente devido à baixa trabalhabilidade da mistura o que aumentou os espaços de ar. Geralmente, houve pouca mudança no módulo de elasticidade devido à temperatura, com a exceção para um tipo de resina epoxídica, na qual se verificou um aumento.

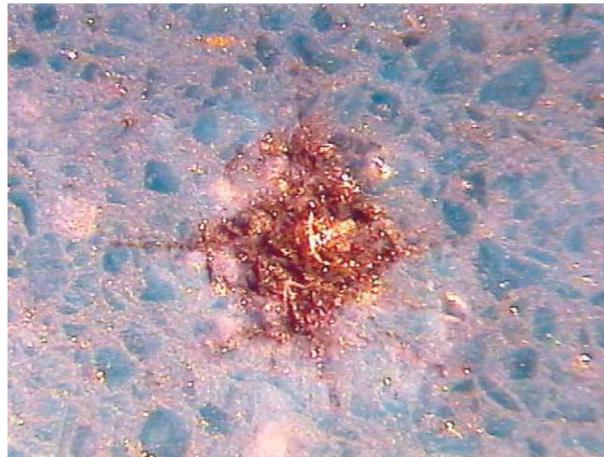
El-Hawary et al. [52] investigaram o comportamento de betão polimérico com várias resinas epoxídicas imersas em água do mar. Para o efeito, moldaram diversos provetes e dividiram-nos em quatro grupos. No 1º grupo, os provetes foram imersos em tanques com água salgada, e os tanques foram então colocados num forno. Foram usadas duas temperaturas diferentes, 60°C e 80°C. A 80°C os provetes foram mantidos em durações de tempo de 1, 3, 6 e 12 meses, enquanto que a 60 °C os provetes foram mantidos por 1,

3 e 6 meses. No 2º grupo os provetes foram colocados em tanques de água salgada e os tanques foram mantidos ao ar aberto para estudar o efeito das variações de temperatura. Os provetes foram mantidos por durações de tempo de 6, 12 e 18 meses. No 3º grupo os provetes foram imersos em tanques de água salgada que foram mantidos no laboratório, a temperatura fixa, por períodos de tempo de 1, 3, 6, 12 e 18 meses. O 4º grupo serviu apenas para controlo e os provetes deste grupo não foram sujeitos quer à água salgada quer às temperaturas mais altas.

Após ensaiar os provetes à flexão e à compressão, a investigação [52] permitiu observar:

- Grandes variações resistência dos provetes; no entanto, não houve nenhuma epoxídica que tenha dado bons resultados em todos os testes, o que sugere que maiores factores de segurança devem ser utilizados com qualquer tipo de resina epoxídica.
- A tendência geral para o comportamento dos provetes com o tempo foi a diminuição da resistência devido à cristalização de sal, seguido por um aumento devido à hidratação do cimento. Foi também observada, para alguns provetes, uma redução na resistência também após um ano exposição à água do mar.
- O aumento da temperatura da água do mar água reduziu resistência dos provetes, o que significa que a exposição à água do mar é mais prejudicial em climas quentes.

Sorarue Tassone [53] caracterizaram o processo de degradação da resistência ocorrida em dois tipos de betões poliméricos como consequência do contacto da superfície com objectos duros. O tipo de resina utilizada foi a de polyester. De modo a simular o dano superficial natural resultante de um impacto forte durante a utilização ou manuseamento, foram introduzidos indentações Vickers a diferentes cargas (Figura 3.33), e foi medida a consequente degradação da resistência. Verificou-se que os provetes de betão de polyester não demonstraram nenhuma redução na resistência à flexão até a uma carga de indentação de 60 kg; acima deste valor, a resistência começa a diminuir, mas não mais que 15% do seu valor inicial, valor medido a uma carga de indentação de 140 kg.



*Figura 3.33 – Formação de fendas radiais após a indentação Vickers de carga de 100 kg (25x) [53].*

Rebeiz [54] utilizaram desperdícios de garrafas de polietileno tereftalato (PET) para produzir polyester insaturado. A quantidade de resina utilizada foi 40% do peso em PET. O ensaio à compressão foi realizado em provetes cilíndricos de 75x150 mm e a resistência à tracção foi obtida usando provetes de 50x50x205 mm.

Neste estudo [54], a resistência à compressão e tensão últimas do betão polimérico são normalmente de duas a três vezes maiores às do betão de cimento Portland. Na rotura, o betão polimérico quebra violentamente e o núcleo remanescente dos cilindros tinha a forma de um cone ou de uma superfície de ruptura quase vertical. O módulo de elasticidade relativamente elevado do betão polimérico faz com que o material seja adequado para uso em aplicações de pré-moldados. Inversamente, as resinas também podem ser formuladas para produzir betão polimérico com baixo módulo de elasticidade, tornando o material adequado para reparação de betão de cimento Portland, especialmente em situações que envolvem grandes movimentos térmicos e mecânicos.

Relativamente ao efeito da idade na resistência à compressão e flexão do betão polimérico, os autores [54] concluíram que este material realiza mais de 80% de sua resistência aos 28 dias em apenas um dia (Figura 3.34). Inversamente, o betão de cimento Portland num dia geralmente atinge cerca de 20% da sua resistência aos 28-dias. O ganho de resistência inicial é importante em aplicações de pré-fabricados porque permite que as estruturas resistam às maiores tensões iniciais resultantes do tratamento, transporte e das operações de construção.

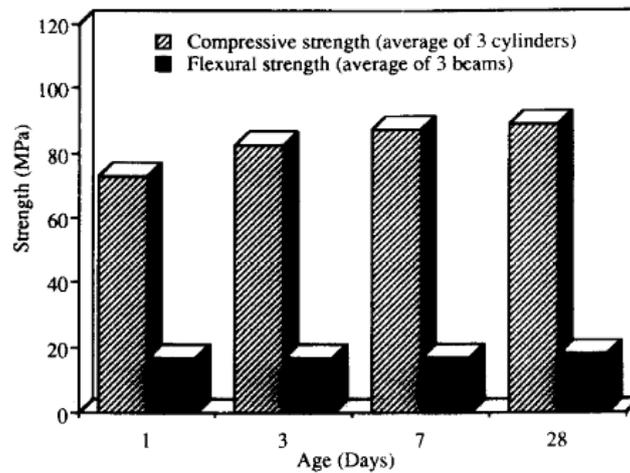


Figura 3.34 – Efeito da idade na resistência à flexão e à compressão [51].

Para o estudo do efeito da temperatura, os autores [54] colocaram os fillers (brita, areia e cinza volante) e os utensílios de mistura numa câmara ambiental à temperatura designada por 48h antes de iniciar a mistura. Após a mistura estar feita, os provetes foram colocados na câmara ambiental na temperatura designada por um período de 28 dias. As temperaturas usadas foram de  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$  e  $60^{\circ}\text{C}$ . Observou-se que um aumento em temperatura levou a uma perda na resistência do betão polimérico (Figura 3.35) devido à perda de resistência do ligante de resina e a consequente diminuição da força das ligações entre os agregados inorgânicos e o ligante de resina, provando-se que o betão polimérico é mais susceptível às altas temperaturas que o betão de cimento Portland. No entanto, apesar da sua perda em resistência a altas temperaturas, o betão polimérico continua pelo menos duas vezes mais resistente à compressão e especialmente à flexão que o betão de cimento Portland.

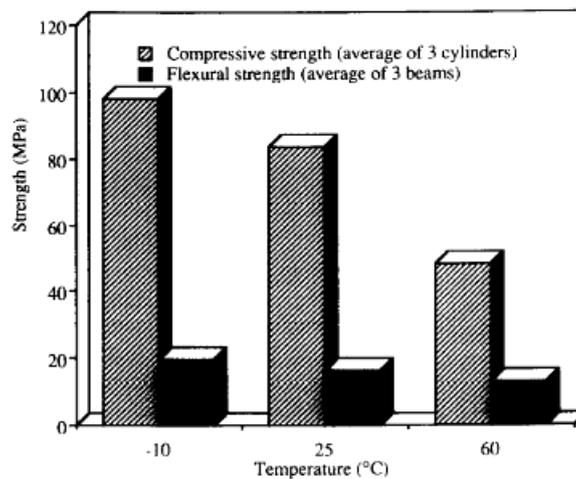


Figura 3.35 – Efeito da temperatura na resistência à flexão e à compressão [54].

Ribeiro et al. [55] citam Ohama que estudou a resistência de betão polimérico de resina polyester à água quente. Para isso, foram testados provetes cilíndricos à compressão e flexão, após imergi-los em água a ferver durante um ano. Foi concluído que a erosão dos provetes aumentou e a resistência diminuiu, com o tempo de imersão, sem mudanças de temperatura nem de aspecto.

Cardwell et al [56] testaram os efeitos da temperatura na resistência do material à rotura frágil de resinas epoxídicas modificadas com borracha. Para preparar os provetes, a resina epoxídica foi primeiramente aquecida até aos 110 °C para baixar a viscosidade da resina, facilitando a distribuição das partículas de borracha. As partículas de borracha foram então adicionadas lentamente e misturadas à mão. Seguidamente a mistura foi colocada em vácuo e foi misturada mecanicamente durante 10 minutos para dispersar as partículas e retirar o gás da resina. O agente de cura foi então adicionado e misturou-se por 5 minutos. A mistura foi então colocada num molde pré-aquecido e curada a 120 °C durante 16 horas. Os provetes não modificados foram preparados da mesma forma mas sem a adição de borracha.

Os autores [56] concluíram que os provetes de resina epoxídica não modificados não mostraram dependência nas condições de teste, enquanto que os provetes modificados com borracha mostraram um aumento resistência à rotura frágil com o aumento da temperatura.

Hwang et al [57] juntaram desperdícios de mármore artificial à resina e estudaram a quantidade de ar e resistência a água quente dos provetes. A quantidade de ar nos provetes foi testada de acordo com a norma JIS A 1174. Para o teste da resistência à água quente os provetes foram curados em água a 90 °C por 28 dias e, posteriormente, foi medida a sua resistência à flexão e compressão. O estudo permitiu concluir que a adição de mármore aumentou o conteúdo de ar entranhado e que a resistência dos provetes diminuiu com a imersão em água quente.

Os mesmos autores [58] prepararam 20 provetes diferentes usando diferentes quantidades de escória de aço e resina polyester. A performance dos provetes foi então examinada por meio de testes à resistência à flexão e compressão, teste de absorção, teste de resistência à água quente, medição da distribuição dos poros e observação das micro-estruturas. O teste de absorção consistiu em secar os provetes previamente curados a  $80\pm 2$  °C, até o seu peso ficar constante para posteriormente os imergir em água durante 48h a  $20\pm 2$  °C. O teste de resistência à água quente foi realizado da mesma forma que o ensaio dos mesmos autores descrito anteriormente [57], a medição da distribuição dos poros foi efectuada com o auxílio de um porosímetro de mercúrio e a observação das micro-estruturas foi realizada através de um microscópio electrónico. Deste trabalho experimental, puderam-se retirar as seguintes conclusões:

- A resistência dos provetes aumentou significativamente à medida que a quantidade de escória de aço aumentava;
- A resistência diminuiu significativamente após o teste de resistência à água quente devido à decomposição e degradação térmica do polímero-agregado;
- A absorção de água diminuiu significativamente com a adição de escória de aço;
- O volume de poros e porosidade aumentou após o teste de imersão em água quente e que o diâmetro médio dos poros aumentou com o aumento da quantidade de agregado, tendo diminuído após o teste de imersão em água quente.

Chikhi et al. [59] juntaram resina epoxídica a borracha líquida para estudar o seu comportamento. Os autores concluíram que quando a resina epoxídica é modificada

com a borracha líquida, todas as características de reactividade tais como a temperatura, tempo de cura, e pico exotérmico, diminuiram. A análise de infravermelhos evidenciou a ocorrência de uma reacção química entre os dois componentes. A adição da borracha líquida levou a uma diminuição da temperatura de vitrificação e da resistência da resina. Como esperado, a adição da borracha levou também a uma diminuição do módulo de elasticidade.

Zainuddin et al. [60] fizeram estudos de durabilidade em resinas epoxídicas enchidas com nano-argila. As amostras foram condicionadas a quatro tipos de ambiente: frio seco, frio molhado, quente seco e quente molhado. Para o condicionamento frio molhado/seco os provetes foram colocados numa caixa com/sem água e posteriormente num congelador. Para o condicionamento quente seco, as amostras foram colocadas numa estufa e mantidas a temperaturas 60 e 80°C respectivamente. Para o condicionamento quente-molhado, os provetes foram colocados em recipientes de vidro com água quente e mantidos a duas temperaturas elevadas e 60 e 80 °C, respectivamente.

Os autores [60] verificaram que a matriz da resina epoxídica é sensível ao condicionamento ambiental, especialmente em ambientes molhados. Em todos os ambientes foi verificado um aumento de peso nas amostras, sendo maior nos provetes condicionados aos ambientes quentes-molhados. Foi observada uma descoloração na superfície dos provetes condicionados aos ambientes quente-seco e quente-molhado, sendo que a adição de nano-argila diminuiu a descoloração. As características mecânicas foram sendo degradadas ao longo do tempo para todos os provetes, mas para as amostras com nano-argila verificou-se uma degradação menor. A análise ao microscópio electrónico mostrou que existem menos fracturas nos provetes com nano-argila.

### **3.3.2 RESISTÊNCIA QUÍMICA**

Mohamed et al. [61] efectuaram um estudo focado em avaliar a durabilidade de betão polimérico com materiais reciclados tais como enxofre (desperdício da indústria do petróleo), cinza-volante e areia do deserto, através de testes de absorção, condutividade

hidráulica, resistência a ácidos, resistência ao sal, resistência à compressão, avaliação da microestrutura, avaliação mineralógica A absorção da mistura foi determinada pesando os provetes e depois imergindo-os em água desionizada e numa solução salina de 3% de NaCl a 24°C durante 24h sendo posteriormente secos e pesados novamente.

Neste estudo [61] a condutibilidade hidráulica foi testada após a imersão em água desionizada, solução salina de 3% de NaCl e em diferentes concentrações de ácido sulfúrico. Os provetes cilíndricos foram primeiramente saturados na solução de teste durante 24h à temperatura ambiente. Os provetes foram então colocados dentro de uma membrana de borracha e foi aplicada pressão de água à volta da membrana de borracha para prevenir o escoamento lateral durante o teste. Seguidamente, foi aplicada uma pressão de água de 2,2 MPa através dos provetes e a quantidade de líquido passado foi apontado em função do tempo.

Os testes de resistência aos ácidos foram efectuados [61] em provetes cilíndricos com dimensões 85 × 38 mm. Os provetes foram imersos em solução de 40% de ácido sulfúrico durante 24h para a inspecção visual, em soluções de 20, 40, 70 e 98% de ácido sulfúrico durante 24 h para a determinação da perda de massa e em diferentes ácidos tais como ácido sulfúrico, ácido fosfórico, ácido bórico e ácido acético para estudar o efeito do tipo de ácido na perda de massa e na perda de resistência. A resistência ao sal foi avaliada através imersão de provetes durante 7 dias em soluções de NaCl de diferentes concentrações (1, 2, 3, 4 e 5 %) a 24°C e também através da imersão de provetes numa solução de 3% de NaCl em diferentes intervalos ao longo do período de um ano.

Neste estudo [61], o teste de absorção mostrou que o tipo de betão polimérico (SPC) em estudo tem uma baixa taxa de absorção de água comparativamente ao betão de cimento Portland (PCC). A explicação para estes resultados é o facto do enxofre e o polímero previnem a penetração de água pois são materiais hidrofóbicos. O teste de condutibilidade hidráulica indicou que o material tem uma permeabilidade muito baixa à água. Perante a água de pressão de 2,2 Mpa, os provetes de betão polimérico mostraram uma condutibilidade térmica na ordem dos  $1.456 \times 10^{-13}$  m/s, enquanto os provetes de betão de cimento Portland mostraram uma condutibilidade térmica na ordem dos  $8.39 \times 10^{-8}$  m/s, após terem sido imersos em água.

A imersão em solução de 40 % de ácido sulfúrico mostrou, de acordo com os autores [61], que os provetes de betão polimérico permaneceram estruturalmente estáveis sem sinais de corrosão, ao contrário dos provetes de betão de cimento Portland (Figura 3.36) que mostraram alta efervescência e tomaram uma cor esbranquiçada devido à formação de Sulfato de Cálcio.

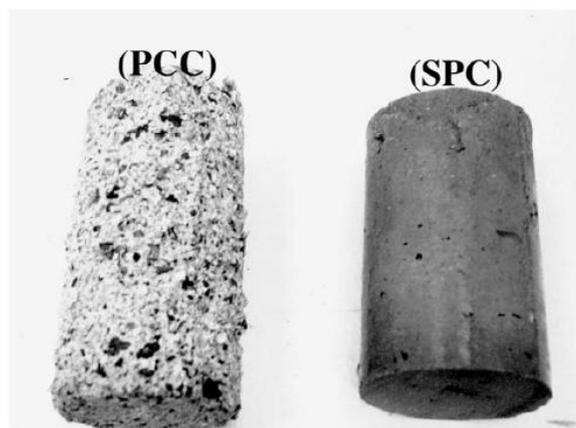


Figura 3.36 – Aspecto dos provetes de betão após a imersão de um dia numa solução 40% de ácido sulfúrico [61].

A perda de massa dos provetes de betão polimérico em diferentes concentrações de ácido sulfúrico foi muito pequena, na casa dos 0,29%, após a imersão em solução de  $H_2SO_4$  a 98% (caso mais gravoso), sendo menor que a perda de massa verificada nos provetes de betão de cimento Portland que foi na ordem dos 2,7% (Figura 3.37). Em relação à resistência à compressão dos provetes de betão polimérico o estudo [61] apresentou uma perda de 7,5% da sua resistência inicial para o caso mais gravoso.

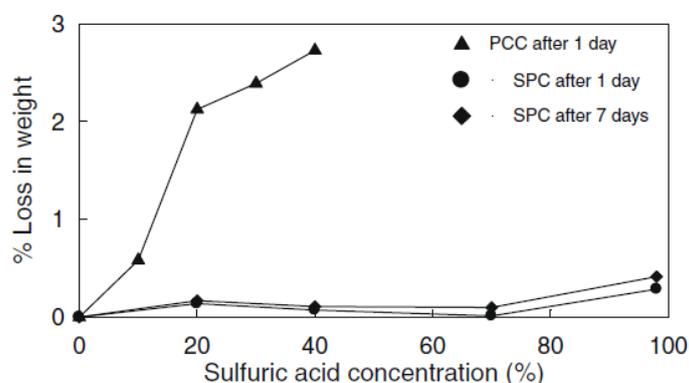


Figura 3.37 – Efeito da concentração de ácido sulfúrico na perda de massa no betão convencional (PCC) e betão polimérico (SPC) [61].

De acordo com o mesmo estudo [61], o teste de durabilidade em ambientes salinos demonstrou que à medida que o período de teste aumentava, a resistência à compressão mostrou um decréscimo insignificante, durante o período de imersão de 12 meses (Figura 3.38). A baixa absorção de água e a alta tolerância ao sal do betão polimérico dificultou a penetração da solução salina, mantendo assim a sua alta resistência.

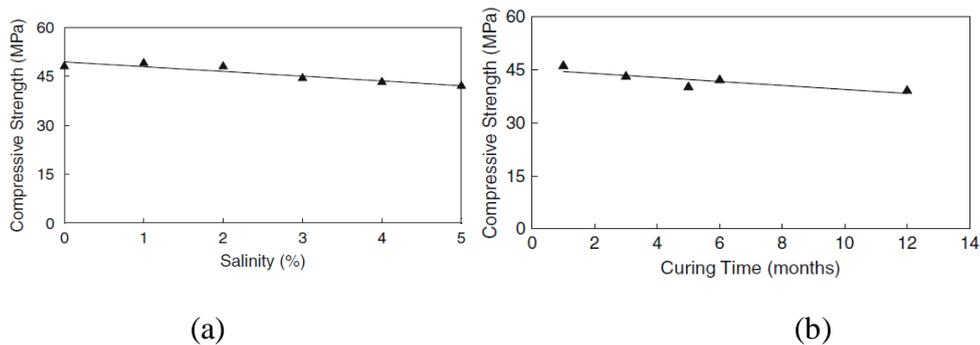


Figura 3.38 (a) – Resistência à compressão do betão polimérico curado numa solução salina 3% durante um ano a 24°C; (b) Resistência à compressão do betão polimérico curado por 7 dias em diferentes salinidades a 24 °C [61].

Ribeiro et al. [55] analisaram a resistência química de betões de polyester e de epoxy expostos a ácidos e sais. Os foram curados durante um dia à temperatura ambiente e depois a 80°C durante 3 horas. Os provetes curados foram testados à sua resistência química à temperatura ambiente. Os tipos de soluções de teste foram 10% Ácido Sulfúrico e 10% de Cloreto de Sódio. Foi usada também uma solução de água destilada para controlo. Depois do seu peso ter sido anotado, os provetes foram imersos nas soluções por períodos de tempo de 1, 7, 21, 56 e 84 dias, sendo o seu peso anotado no final de cada ciclo.

Os autores [55] verificaram que a resistência à flexão do betão de epoxy é ligeiramente afectada pela imersão nas soluções de ácido sulfúrico e de cloreto de sódio, o que é um bom indicador da boa resistência química que este material tem a estes agentes agressivos. Para todas as soluções químicas, betão de polyester registou uma perda de resistência à flexão bastante superior à do betão de epoxy, sendo explicado pela maior permeabilidade deste tipo de resina. Em relação à variação de massa, esta foi muito pequena para todos os provetes e foi sempre menor para os provetes de polyester. A discrepância de valores foi mais significativa em relação à imersão em água, o que

indica que o cloreto de sódio e o ácido sulfúrico, nas concentrações utilizadas, inibem a absorção de água.

Os mesmos autores [55], citam Mebarkia e Vipulanandan que analisaram as mudanças de resistência à compressão devido à imersão em várias soluções químicas durante um mês, descobrindo que a resistência diminuía à medida que o pH das soluções aumentava. No mesmo artigo [55], é citado Yamamoto que fez um estudo comparativo entre betão polimérico de resina polyester e betão de cimento Portland em relação à resistência a ataque ácido. Este imergiu os provetes em ácido hidrocloreto 10% e ácido sulfúrico 10% por um período de 28 dias. Não foi verificada perda de massa no betão polimérico, ao contrário do que foi observado no betão de cimento Portland, cujos provetes perderam cerca de 50% do seu peso inicial.

Ribeiro et al. [55] citam Chawalwala que estudou a aplicação de betão polimérico de vinyl e polyester como superfície de desgaste para uma plataforma de uma ponte. Foi investigado o comportamento dos betões poliméricos, quando expostos à água e a químicos como óleo de motor e soluções anticongelantes. Concluiu-se que a degradação do material foi principalmente devida ao enfraquecimento da relação entre o agregado e a matriz de polímero, que depende da quantidade de água absorvida.

Soraru e Tassone [53] referenciam Bubani M, Tassone P. que estudaram a influência do ataque químico em algumas propriedades do betão polimérico com polyester. Para o efeito, os autores imergiram os provetes numa solução de NaOH 10% durante 1000 h e, posteriormente, testaram a resistência à flexão dos provetes. Observou-se que as amostras mantiveram cerca de 20-30% dos seus valores iniciais.

Gorninski et al. [62] estudaram o efeito do tipo de resina (polyester isoftálico ou polyester ortoftálico), concentração de cinza volante (8, 12, 16 e 20%) e tipo de solução ácida na resistência dos provetes. Foram moldados provetes de dimensões 4 x 4 x 16 cm. Foram curados a 30°C durante 7 dias e depois os ciclos de exposição de 14 dias começaram. Cada ciclo de exposição consistiu em imergir as amostras por 7 dias numa solução química e, posteriormente deixadas a secar durante 7 dias. Os provetes foram pesados antes do início de cada ciclo. Depois do ciclo de imersão, os provetes foram lavados com água à pressão de modo a simular o efeito da abrasão mecânica e para

remover qualquer produto corrosivo das suas superfícies. Os provetes foram deixados a secar num ambiente em laboratório controlado durante 7 dias. Depois do ciclo de secagem, os provetes foram pesados novamente após terem cumprido o ciclo de 14 dias. A cada novo ciclo, o agente agressivo foi substituído por uma solução nova. O pH das soluções foi medido antes de imergir os provetes e depois de os remover.

Os agentes agressivos usados pelos autores [62] foram: ácido acético, ácido cítrico, ácido fórmico, ácido láctico, ácido sulfúrico, coca-cola e água destilada. Todos os ácidos foram diluídos a 5%. Foram programados cinco ciclos de exposição. O volume das soluções agressivas somou 4 vezes o volume dos provetes. Após o ciclo de exposição final, os provetes foram testados à resistência à flexão.

Os resultados deste estudo [62] mostraram que os seguintes factores têm um efeito significativo na resistência do betão polimérico após o ataque químico: tipo de resina, tipo de solução agressiva, concentração de cinza volante na composição do betão. Verificou-se também que a resistência à flexão das amostras sujeitas ao ácido acético 5% foi consideravelmente diferente dos resultados para as outras soluções. A diferença em valores de resistência para as amostras expostas à água destilada, ácido fórmico, ácido láctico e ácido cítrico não foi significativa.

As amostras expostas à coca-cola e ao ácido sulfúrico não mostraram neste estudo [62] diferenças significativas quando comparadas uma com a outra, mas a diferença foi significativa quando comparada com as outras 5 soluções. Em todos os casos, verificou-se uma diferença significativa na resistência entre as amostras expostas aos agentes agressivos quando comparada com a resistência dos provetes de referência (sem exposição). Também se verificou que os provetes não mostraram perda de massa, ao contrário do que acontece no betão de cimento Portland. Os valores obtidos mostraram que o betão polimérico tem uma óptima resistência à flexão comparativamente ao betão de cimento Portland. Outra diferença encontrada entre os dois foi o quociente entre a resistência à flexão e a resistência à compressão. Em betão de cimento Portland, os valores de resistência à flexão correspondem a aproximadamente 10% dos valores da resistência à compressão. No caso do betão polimérico, os valores da resistência à flexão correspondem a 22.2-25% dos encontrados para a resistência à compressão. Foi

também observado que o betão polimérico mostrou um aumento de resistência à flexão com o aumento de concentração em cinza volante.

Reis[63] verificou os efeitos de várias soluções agressivas em betão de resina epoxídica misturada com areia. Foram moldados provetes prismáticos com dimensões 40 x 40 x 160 mm para os testes à resistência à flexão e provetes cilíndricos de dimensões Ø50 x 100 mm para os testes à compressão. Todas as amostras foram deixadas a curar durante 7 dias à temperatura ambiente e, deixadas a secar a 60°C durante 4h antes dos testes à resistência. Os agentes agressivos usados foram: água destilada, coca-cola, água do mar, ácido sulfúrico, ácido acético, ácido fórmico, ácido cítrico e ácido lácteo. Os ácidos foram diluídos a 5%. A água do mar trata-se de um ambiente complicado para a degradação devido aos micro-organismos, animais, sal, luz solar, flutuação da água, chuva, etc. O autor utilizou o mesmo método experimental descrito acima [62].

O mesmo estudo [63] também permitiu concluir que tanto os valores de resistência à flexão como os da resistência à compressão após a exposição foram bastante maiores quando comparados com os valores típicos de betão de alta resistência de cimento (Tabela 3.3).

*Tabela 3.3 – Perda de resistência à flexão e à compressão do betão polimérico após os ciclos de degradação, adaptado de [63].*

<b>Tipo de Solução</b>	<b>% de Perda de Resistência à Flexão</b>	<b>% de Perda de Resistência à Compressão</b>
Água destilada	5,9	0,7
Coca-Cola	0,6	36,2
Ácido Sulfúrico	11,6	0,9
Água do Mar	7,4	4,7
Ácido Lácteo	25,8	28,7
Ácido Cítrico	10,5	4,4
Ácido Fórmico	84,7	55,6
Ácido Acético	68,1	7,1

O maior valor de perda de resistência à flexão apresentado pelo autor [63] foi de 84,7% para o ácido fórmico e o menor foi de 0,6% para os provetes imersos em coca-cola. Os provetes imersos em ácido fórmico também mostraram uma grande perda na resistência à compressão, na ordem dos 55%. Ao contrário do que é observado no betão de cimento Portland comum, não foi observada nenhuma perda de massa significativa, tendo-se

verificado que a maior perda foi de 4,6% para os provetes imersos em ácido fórmico. Notaram-se também diferenças a nível visual, especialmente para os provetes expostos a ácido sulfúrico e coca cola.

Gaier [16] estudou o efeito dos ácidos em 15 tipos de betões, nos quais 5 eram de resina epoxídica proveniente de 5 empresas diferentes. O ensaio também seguiu o método apresentado por Gorninski et al. [62] que foi também utilizado em pesquisas semelhantes. Para cada material foram moldados provetes prismáticos, medindo 4 x 4 x 16 cm, para os ensaios de agressão química.

O estudo permitiu concluir que os provetes de resina foram os que apresentaram menor perda de resistência à flexão. Os resultados obtidos nos ensaios de perda de massa e resistência à flexão demonstraram que os materiais de reparação de base orgânica realmente se constituem materiais valiosos a serem utilizados na reparação de estruturas em ambientes ácidos, pois de todas as argamassas analisadas, estes foram os que apresentaram as melhores características físicas, químicas e mecânicas.

Liu e Vipulanandan [64] investigaram a performance a longo prazo de tijolos de argila revestidos com resina epoxídica, tendo como objectivos determinar o efeito da mistura inicial (no tijolo) na resistência das ligações, determinar o comportamento dos tijolos revestidos com e sem furos em várias soluções de diferentes pH, determinar a correlação entre a resistência das ligações e a resistência química e modelar o comportamento da absorção de líquido pelos tijolos de argila revestidos com epoxy. Para estudar a resistência química dos tijolos revestidos com epoxy, provetes de dimensões 41 x 76 x 152 mm foram imersos no reagente seleccionado em metade das suas alturas numa garrafa fechada de modo a que os provetes estivessem expostos à fase líquida e à fase de vapor (Figura 3.39). Para o teste, foram feitos dois furos a uma profundidade aproximada de 15 mm para representar os defeitos no revestimento. De modo a determinar o efeito do tamanho do furo, foram escolhidos diâmetros de 3, 6 e 13 mm.

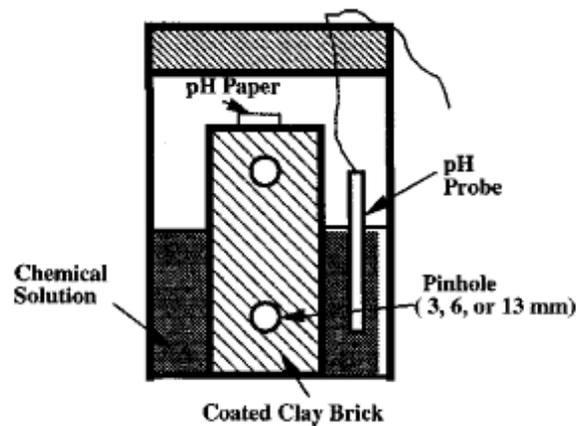


Figura 3.39 – Testes químicos aos tijolos revestidos com resina epoxídica [64].

Os reagentes de teste seleccionados para o estudo [61] foram água destilada (pH = 5 a 6) e solução de ácido sulfúrico 3% (pH = 0,45, representando as piores condições reportadas para sistemas de esgotos municipais). Após 6 anos de imersão, verificou-se um aumento de massa tanto nos provetes imersos em água destilada como nos provetes imersos em ácido sulfúrico, havendo um maior aumento nos provetes imersos em ácido sulfúrico. Observou-se também que as amostras com furos maiores apresentaram um maior aumento de massa e mais rápido quando comparando com as amostras sem furos. Os autores também verificaram que não existe correlação entre a força das ligações e o seu aumento de massa.

Bakhareva et al. [65] investigaram a resistência de betão polimérico com escória ao ataque ácido. Estes referem que não há nenhum teste standard para o ataque ácido em betão e, por isso, os autores imergiram as amostras de betão numa solução de ácido acético de pH=4. A solução antiga foi substituída com uma solução nova todos os meses nos primeiros 4 meses e depois, aos 6, 9 e 12 meses de exposição. A resistência à compressão e o pH do betão, obtido através do teste com fenoftaleína, foram medidos antes do teste e aos 1, 3, 4, 5 e 12 meses de exposição e a sua deterioração também foi observada. Os resultados demonstraram que, comparativamente ao betão de cimento Portland (OPC), o betão polimérico (AAS) apresenta uma perda de resistência à compressão muito inferior quando imersos em ácido. Esta pequena perda de resistência do betão polimérico apenas foi notada após 4 meses de exposição (Figura 3.40)

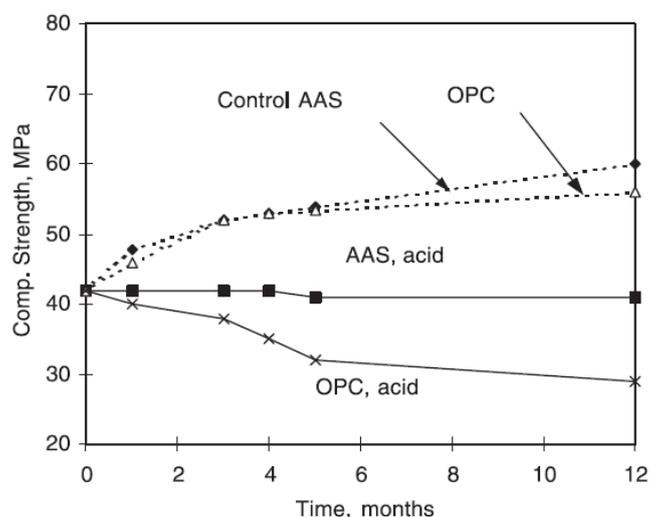


Figura 3.40 – Resistência à compressão do betão polimérico (AAS) e betão convencional (OPC) sujeitos ao ataque ácido [65].

Kurihara et al. [66] executaram provetes cilíndricos de argamassa de epoxídica, argamassa epoxídica modificada e argamassa de vinylester, com dimensões 25 x 50 mm e colocaram-nos em água quente e numa solução de ácido sulfúrico quente. As soluções foram usadas a uma temperatura de 70°C e a concentração de ácido sulfúrico foi de 5%, de modo a acelerar o teste. O teste foi conduzido durante 5 meses. Os resultados demonstraram que a água quente não provocou danos sérios ao contrário do que aconteceu com as amostras imersas em ácido sulfúrico que demonstraram perda de massa em mais de metade após os 5 meses de imersão. A resistência à compressão da argamassa de epoxídica imersa em água quente diminuiu 41% e, no caso das amostras imersas em ácido sulfúrico, esta diminuiu 72%. A argamassa de epoxy modificada foi deteriorada no mesmo grau de 28% em ambas as soluções após os 5 meses. Isto significa que a diminuição de resistência é devida à água quente e não devida ao ácido. A argamassa de vinylester mostrou excelente resistência ao ataque térmico e ácido.

Rossignolo e Agnesini [67] estudaram a resistência à corrosão, e resistência química em betão polimérico modificado com borracha de látex e argila como agregados leves. O teste à corrosão consistiu em imergir os provetes, reforçados com um varão de aço que cujo fim ficava a 5cm do fundo do provete, numa solução de cloreto de sódio 15% ligado a um fornecedor de energia de 12 V DC de modo a que o varão pudesse funcionar como um ânodo (Figura 3.41).

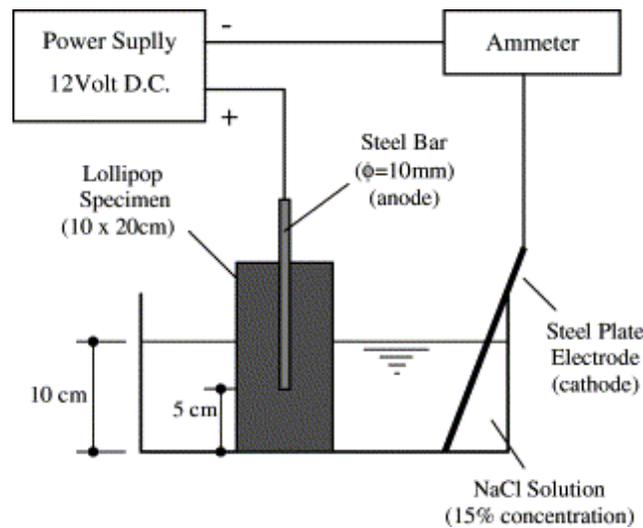


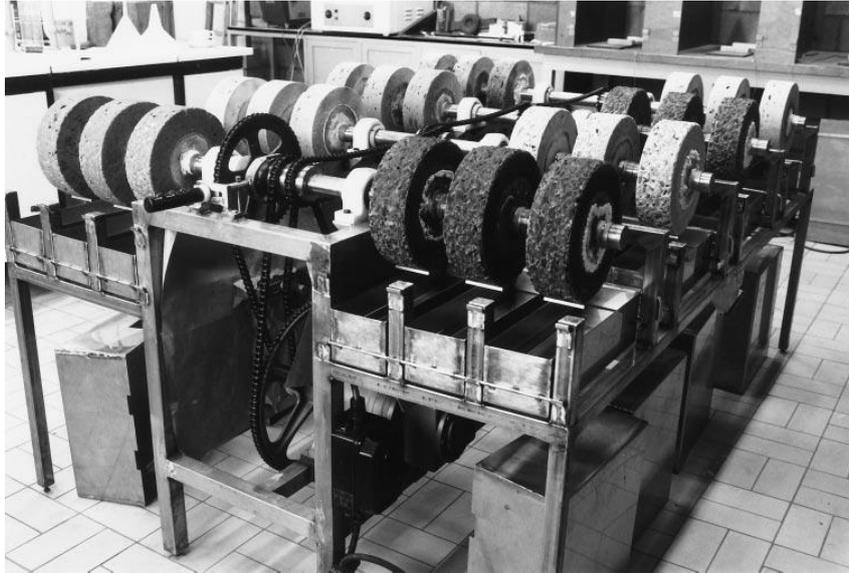
Figura 3.12 – Diagrama esquemático do teste de corrosão acelerada [67].

A realização deste estudo [64] permitiu observar que os provetes modificados com agregados leves forneceram maior resistência ao ataque por corrosão que os provetes não modificados. Também se observou que os provetes modificados apresentaram uma diminuição inicial da intensidade da corrente o que indica uma maior resistência eléctrica para os provetes modificados com borracha e argila.

O teste de resistência ao ataque químico efectuado neste estudo [67] consistiu em imergir provetes cilíndricos e verificar a sua variação de massa, em soluções de ácido sulfúrico 20%, ácido acético 10%, ácido clorídrico 10%, hidróxido de sódio 10%, hipoclorito de sódio 10% e em cloreto de sódio 20%. O peso dos provetes foi examinado aos 1, 7, 28, 56 e 85 dias de imersão. A imersão em ambiente ácido permitiu observar que a perda de massa dos provetes modificados com agregados leves foi significativamente menor que para os não modificados, o que significa que o betão polimérico modificado apresenta uma maior protecção ao ataque ácido comparativamente ao betão polimérico não modificado. Verificou-se também que em imersão em ambiente básico, que tanto o betão polimérico modificado como o não modificado apresentaram perda de massa inferior a 1%

O ácido láctico e o ácido acético causam uma degradação rápida dos pisos de betão em construções da indústria da alimentação. De Belie e Monteny [68] utilizaram um aparelho para testes acelerados de degradação (Figura 3.42) que foi desenvolvido para simular um ataque químico padronizado e automatizado por meio de líquidos agressivos

e desgaste causados por animais e limpeza. Betão polimérico, contendo diferentes quantidades de estírol éster de ácido acrílico, foi submetido a um teste de deterioração acelerada num líquido contendo os dois tipos de ácido. O movimento dos cilindros causaram uma molhagem e secagem do betão automatizado, o que é mais danoso para o material que a imersão contínua, acelerando assim o ataque.



*Figura 3.42 – Máquina de teste para os testes de degradação acelerada [68].*

Os autores observaram [68] que o aumento de concentração de polímero em peso de cimento de 0% a 2,5%, 5% e 7,5% de cada vez causou uma redução significativa na profundidade média de degradação. Não se tendo observado uma melhoria significativa pelo aumento do teor de polímero de 7,5% para 10% ou 15%, os autores concluíram que uma concentração de polímeros de 7,5% proporciona a melhor solução económica.

### **3.4 CONCLUSÕES**

Diversos estudos têm sido realizados de modo a melhor compreender as propriedades do betão polimérico e o seu comportamento face a agentes ambientais.

Relativamente às características mecânicas do betão polimérico, foi provado que este possui excelentes características de amortecimento de vibrações e que o seu coeficiente de expansão térmica varia segundo um largo intervalo, aumentando à medida que a

quantidade de polímero aumenta, o coeficiente de expansão térmica também aumenta, aproximando-se do do polímero de ligação [27]. O coeficiente de expansão térmica do betão polimérico varia entre 13 e 26 mm/mm °K, sendo maior que o do aço e o do betão de cimento Portland [31].

O estudo do comportamento do betão polimérico à fluência [33] permitiu observar que para elevados valores de nível de tensão resultaram numa grande deformação por fluência, contrariamente ao que se sucede no betão convencional que demonstra uma linearidade em fluência. Verificou-se que o betão polimérico é um material linearmente viscoelástico e que a deformação específica depende da carga e o seu comportamento à fluência é totalmente influenciado pela resina ou monómero utilizado e pelo tipo de agregado.

O betão polimérico apresenta um ganho de resistência inicial, importante para tipos de construções em que seja necessário resistir a grandes tensões iniciais resultantes do tratamento, transporte e operações de construção. Para o comprovar [51], verificou-se que este material fica com mais de 80% de sua resistência aos 28 dias em apenas um dia. Inversamente, o betão de cimento Portland num dia geralmente atinge cerca de 20% da sua resistência aos 28 dias.

O betão polimérico mostrou-se sensível às altas temperaturas [43,44,46,47,48,51,52], verificando-se uma perda de resistência quando sujeito a estas temperaturas, devido à perda resultante de resistência da resina e conseqüente diminuição da força de ligação entre esta e os agregados. O betão polimérico é muito mais afectado pelas altas temperaturas que o betão de cimento Portland devido ao facto do sintético viscoelástico aglutinante de resina usado na produção de betão polimérico ser mais sensível à temperatura, provocando uma diminuição da força de ligação entre os agregados e a resina, que o ligante inorgânico de cimento utilizado na produção de betão de cimento Portland. Contudo, apesar desta perda de resistência a altas temperaturas, o betão polimérico continua a ter mais resistência que o betão convencional.

Ciclos térmicos de temperaturas altas afectam também a sua textura [44], causando coalescência dos poros. Os ciclos de gelo-degelo provocam pouca alteração na resistência do betão polimérico [48]. Porém, quando o betão polimérico é sujeito a

temperaturas constantes, não se verifica mudanças nas suas propriedades, desde que este seja levado novamente às suas condições iniciais. No entanto, a sua capacidade de recuperação é gradualmente reduzida com o aumento de temperatura [48].

A absorção de humidade do betão polimérico é baixa [27], porque os seus componentes líquidos polimerizam como um sólido durante a cura e, conseqüentemente, não são criados poros capilares intersticiais. Por isso, maior quanto maior for a quantidade de polímero da mistura, menor será a sua taxa de absorção de água. Foi observado também que ciclos de degradação devido à humidade provocam diminuição na resistência à flexão do betão polimérico, e um aumento de quase para o dobro da sua flecha última. Os ciclos de água salgada ou de nevoeiro salino provocam igualmente uma perda significativa de resistência do material [44].

Relativamente aos efeitos da adição de agregados leves ao betão polimérico [35-41], concluiu-se que quanto maior for a sua quantidade na mistura, menor vai ser a resistência do material e maior será a taxa de absorção de humidade, pois a adição destes agregados provoca um aumento da porosidade da mistura. A adição de agregados leves provoca igualmente uma diminuição do módulo de elasticidade.

O betão polimérico provou ser também um material muito resistente a ambientes ácidos, ao contrário do que se sucede com o betão convencional [16, 61-68]. Em imersão em ácido sulfúrico, o betão polimérico demonstrou permanecer estruturalmente estável, sem sinais de corrosão e que não tem tendência para perder massa ao contrário do betão de cimento Portland [55, 61, 62]. A imersão em ácido fórmico provocou o maior decréscimo no valor de resistência [63], pelo que se conclui que este ácido é o mais degradativo para este tipo de material.

## Capítulo 4

### CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios da caracterização das propriedades dos materiais utilizados na composição das argamassas poliméricas estudadas neste trabalho. Os materiais analisados foram as resinas epoxídicas MC-DUR 1390 K e Icosit KC 220/60. É igualmente referido o processo de obtenção e respectivas características dos materiais utilizados como agregados, nomeadamente o pó de cortiça e o pó de borracha assim como os benefícios ambientais do seu reaproveitamento. De modo a analisar mais aprofundadamente os agregados, foram realizados ensaios de peneiração para determinar a sua granulometria.

#### 4.1 RESINA EPOXÍDICA

Na Tabela 4.1 é apresentada uma comparação das propriedades de uma resina epoxídica típica com as do betão.

Tabela 4.1 – Comparação das propriedades das resinas e do betão [69].

Propriedades (20 °C)	Resinas Epoxídicas	Betão
Resistência à compressão (MPa)	55-110	25-150
Módulo de Elasticidade (GPa)	0,5-20	20-50
Resistência à tracção (MPa)	9-30	1-4
Deformação na rotura por tracção (%)	0,5-5	0,015
Coefficiente de <i>Poisson</i>	0,3-0,4	0,2
Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	11-17	25
Temperatura de transição vítrea, Tg ( C )	45-80	-
Coefficiente de dilatação térmica	25-100	11-13

Foram utilizadas 2 tipos de resinas epoxídicas: MC-DUR1390 VK e ICOSIT KC 220/60. A resina MC-DUR1390 VK foi fornecida pela empresa MC-Bauchemie e a resina ICOSIT KC 220/60 foi fornecida pela empresa SIKA. Ambas as resinas foram fornecidas em dois componentes, de endurecimento a frio e isentos de solventes (Figura 4.1)



Figura 4.1 – Resinas epoxídicas MC-DUR1390 VK e ICOSIT KC 220/60.

As características das resinas foram fornecidas pelo fabricante e são apresentadas na Tabela 4.2 [70,71].

Tabela 4.2 – Características das resinas MC-DUR 1390 VK e ICOSIT KC220/60.

Características		MC-DUR 1390 VK	ICOSIT KC220/60
Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )		10,8	13,6
Pot Life (Min.)		30 (20 °C)	60 (20 °C)
Proporções da Mistura (%)	Resina	75	55
	Endurecedor	25	45
Resistência à Compressão (MPa)		51 (*)	120
Resistência à Flexão (MPa)		31 (*)	35
Módulo de Elasticidade (MPa)		--	4

(\*) Valores obtidos com agregados finos na proporção agregado/resina de 1:4.

## 4.2 CORTIÇA

A cortiça é extraída do tronco e ramos do sobreiro, sob a forma de peças semi-tubulares, habitualmente no Verão, e com uma periodicidade legal mínima (em Portugal) de nove anos. A sua exploração começa após a árvore atingir cerca de 0,7 m de perímetro a 1,3 m do solo. A União Europeia é o maior produtor de cortiça (> 80%), nomeadamente nos países do Sul do Mediterrâneo, dos quais se destaca Portugal (> 50%). Os sobreirais estão extremamente bem adaptados às regiões semi-áridas do Sul da Europa, evitando a desertificação e sendo o habitat perfeito para muitas espécies animais e vegetais. A quase totalidade da cortiça é processada na União Europeia, que importa também alguma cortiça do Norte de África, contribuindo para a economia e emprego europeus [72].

### 4.2.1 ESTRUTURA E COMPOSIÇÃO DA CORTIÇA

#### 4.2.1.1 Estrutura Macroscópica

Quando a cortiça é extraída das árvores, fica exposta a parte exterior do entrecasco, que é “empurrada” pelas sucessivas camadas de novas células que se vão formando no interior, originando-se a “raspa”, que é o principal constituinte da “costa” da cortiça (parte externa), que seca, contrai e endurece, fendilhando devido ao crescimento.

Analogamente, a parte interna do tecido suberoso, que corresponde à última camada de crescimento anual, é designada por “barriga” ou “ventre”. Tem menor elasticidade do que as outras camadas e apresenta orifícios dos canais lenticulares (poros). A porosidade está estreitamente ligada à qualidade da cortiça. A cortiça virgem não apresenta raspa [72].

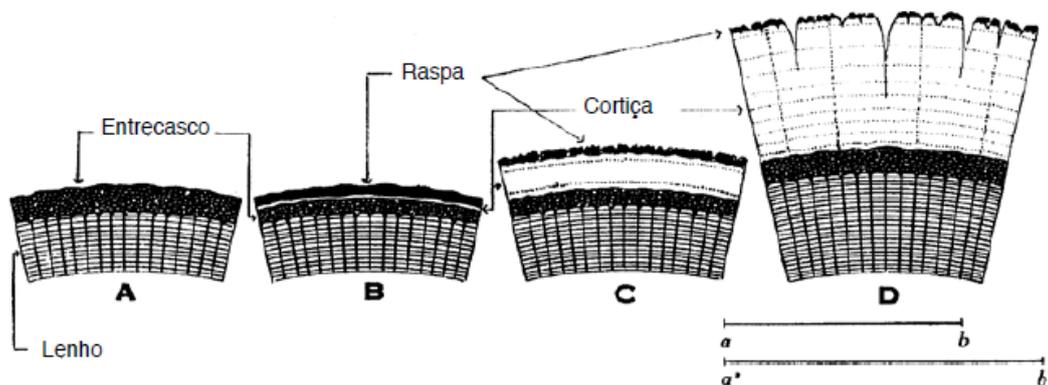


Figura 4.2 – Estrutura macroscópica da cortiça [72]

A estrutura da cortiça é anisotrópica. As três principais direcções definidas para a cortiça são a radial (paralela aos raios da árvore), a axial (direcção vertical na árvore) e tangencial (perpendicular às outras duas, tangente à circunferência da secção da árvore). As secções perpendiculares a estas três direcções são respectivamente designadas por tangencial, transversal e radial. No entanto a anisotropia deixa de ser sentida quando temos um aglomerado de cortiça, dada a orientação aleatória dos grânulos [72].

#### 4.2.1.2 Estrutura Microscópica

A cortiça é um tecido constituído por células, dispostas de modo compacto, sem espaços livres, de uma forma regular, cujo conteúdo desapareceu durante o crescimento, e sofreu um posterior processo de suberificação (impermeabilização) das membranas celulares. Não é apenas a estrutura do tecido que confere à cortiça as suas características, pois muitas das suas propriedades devem-se também à natureza das membranas celulares. As células comunicam entre si por microcanais que atravessam a parede celular (plasmodesmos). As paredes celulares são constituídas por uma base estrutural de lenhina e celulose com suberina e polifenóis e ainda com ceras extractáveis. A parede

celular das células de cortiça apresenta cinco camadas: duas de natureza celulósica que forram as cavidades celulares; duas mais interiores suberificadas (com suberina e ceras; conferem impermeabilidade) e uma camada média lenhificada (que confere rigidez e estrutura) [72].

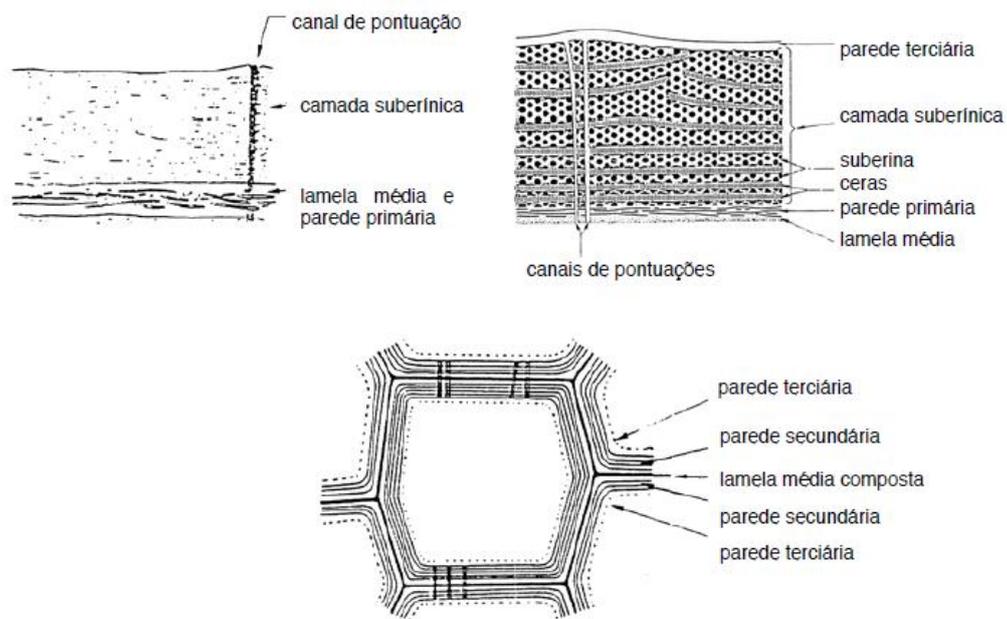


Figura 4.3 – Estrutura microscópica da cortiça [72]

#### 4.2.1.3 Composição Química

A constituição química da cortiça, engloba vários tipos de compostos, que tradicionalmente são divididos em cinco grupos [72]:

- a) suberina (45% - responsável pela sua compressibilidade e elasticidade);
- b) lenhina (27% - estrutura das paredes celulares);
- c) polissacáridos (12% - também ligados à estrutura da cortiça);
- d) ceróides (6% - repelem a água e contribuem para a impermeabilidade);
- e) taninos (6% - cor e protecção/conservação do material)
- f) cinzas (4%)

Assim, a cortiça é constituída por componentes estruturais de forma polimérica complexa e extensa e componentes não estruturais. Estes últimos dividem-se em extractivos e não extractivos. Os extractivos dividem-se nos ceróides, que influem nas características de impermeabilização da cortiça, e nos compostos fenólicos, que parecem desempenhar funções protectoras contra os ataques de organismos biológicos [72].

#### **4.2.2 PROPRIEDADES DA CORTIÇA**

A cortiça é um material natural riquíssimo de características inigualáveis. Conhecido pelas suas propriedades [72]:

- Leveza;
- Flutuabilidade;
- Compressibilidade;
- Elasticidade;
- Vedante;
- Isoladora;
- Imputrescível;
- Inodora;
- Durabilidade;
- Resistente ao fogo;
- Reciclável e biodegradável;
- Baixa condutividade térmica;
- Grande capacidade de absorção de energia (em impacto);
- Grande capacidade de dissipação de energia (em vibrações);

- Elevado coeficiente de atrito;
- Resistente ao desgaste

Devido à sua leveza, a cortiça apresenta uma excelente capacidade de compressibilidade, aliada à flexibilidade das suas membranas, o que permite uma rápida recuperação da sua forma inicial após a compressão.

Na Tabela 4.3 são apresentados as características físicas e mecânicas da cortiça [73]:

*Tabela 4.3 – Características físicas e mecânicas da cortiça, adaptado de [73].*

<b>Características</b>	<b>Valor Médio</b>
Massa Volúmica	180 Kg.m <sup>-3</sup>
Módulo de Young (compressão)	13 MPa
Módulo de Young (tracção)	18 MPa
Coeficiente de Poisson	0,18
Coeficiente de precipitação de energia	0,2
Coeficiente de atrito	0,3
Calor específico (P cte)	35 J.Kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
Coeficiente de difusão de água (20 C)	4x10 <sup>-10</sup> m <sup>2</sup> .s <sup>-3</sup>
Difusidade térmica	10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
Condutividade térmica	0,045 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
Tensão de ruptura (tracção)	19 MPa

#### **4.2.3 PÓ DE CORTIÇA**

Os granulados de cortiça são obtidos através da acção de vários tipos de moinhos em função do material a triturar e do tipo de grânulos pretendidos. É também, geralmente, efectuada uma secagem por circulação forçada de ar quente, usualmente em secadores rotativos, para conferir ao granulado o grau de humidade desejado.

São considerados granulados os fragmentos de cortiça de granulometria superior a 0,25 mm e inferior a 22,4 mm. As partículas inferiores a 0,25 mm são consideradas pó de cortiça [74]. Os granulados e/ou os regranulados podem ser utilizados como produto final com a função de isolamento térmico, no enchimento de espaços vazios entre paredes duplas ou sobre o tecto do último piso. São também utilizados na preparação de argamassas com cimento, para aligeirar o peso em determinados elementos de

construção, ou mesmo para fabrico de peças/blocos de construção. Este material também pode ser utilizado para a preparação de argamassas ou betões poliméricos.

No presente trabalho utilizou-se pó de cortiça proveniente dos desperdícios da preparação e transformação da cortiça pela empresa FABRICOR, sem qualquer tipo de tratamento, tendo apenas o cuidado de recolher a cortiça o mais em pó possível.

Apresenta-se na Figura 4.4 o aspecto do produto



*Figura 4.4 – Aspecto do produto final do pó de cortiça.*

#### **4.2.4 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA**

A caracterização da cortiça recolhida foi efectuada através da peneiração de 200 gramas de cortiça, segundo a norma NP EN 933-1 Parte 1 [75]. Na peneiração utilizou-se uma coluna de peneiros normalizados de malha quadrada com dimensões compreendidas entre 0,075 e 4,76 mm. A peneiração foi realizada num equipamento de agitação mecânica (Figura 4.5).



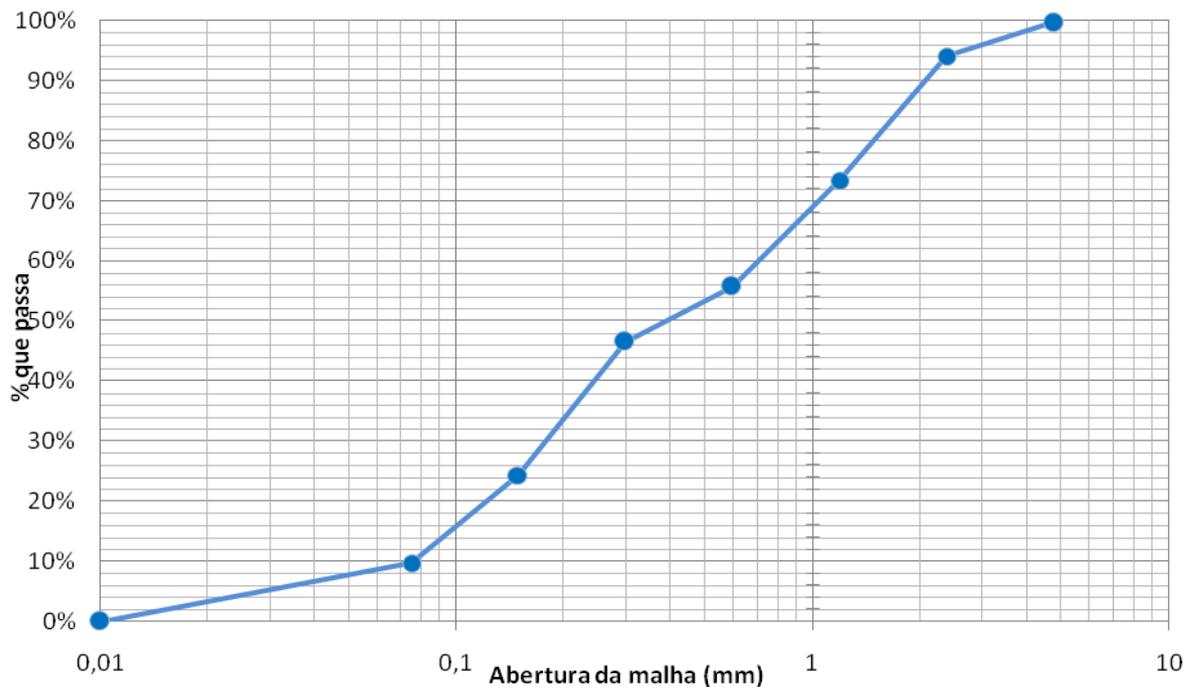
*Figura 4.5 – Equipamento de peneiração mecânica.*

Após a agitação, os materiais retidos em cada peneiro foram pesados, tendo-se obtido a respectiva curva granulométrica. Na Tabela 4.4 são apresentados os resultados da análise granulométrica da cortiça recolhida.

*Tabela 4.4 – Percentagens de material passado e retido em cada peneiro (Pó de Cortiça)*

<b>Peneiros</b>	<b>Malha</b>	<b>Massa Retida (g)</b>	<b>% Retido</b>	<b>% Retido acumulado</b>	<b>% Total que passa</b>	<b>% Total retido</b>
Nº 4	4,76	0,74	0,37	0,37	99,63	0,37
Nº 8	2,38	11,11	5,56	5,93	94,08	5,92
Nº 16	1,19	41,40	20,70	26,63	73,38	26,62
Nº 30	0,595	35,29	17,65	44,27	55,73	44,27
Nº 50	0,297	18,45	9,23	53,60	46,51	53,49
Nº 100	0,149	44,34	22,17	75,67	24,34	75,66
Nº 200	0,075	29,20	14,60	90,27	9,74	90,26
refugo	0,01	19,47	9,74	100	0	100
Módulo de Finura						3,97

A partir dos dados da Tabela 4.4, construiu-se a curva granulométrica do material recolhido, que relaciona a abertura da malha (nº do peneiro) com a percentagem total que passa desse peneiro.



*Figura 4.6 – Curva granulométrica do pó de cortiça.*

Da análise granulométrica analisaram-se quatro parâmetros (Tabela 4.5): Módulo de finura, máxima dimensão, mínima dimensão e percentagem de material que passa no peneiro 0,075mm.

O módulo de finura indica a dimensão média ponderada do grupo na qual é retido a maior quantidade de material. Quanto maior for o módulo de finura, mais grosso será o agregado.

A máxima dimensão (D) é a menor abertura da malha do peneiro onde passa uma quantidade de agregado igual ou superior a 90%.

A mínima dimensão (d) é a abertura da malha do peneiro onde passa uma quantidade de agregado igual ou inferior a 5%.

A percentagem de finos trata-se da percentagem do material que passa no peneiro de 0,075mm.

*Tabela 4.5 – Parâmetros caracterizados na análise granulométrica do pó de cortiça.*

<b>d</b>	<b>D</b>	<b>Módulo de Finura</b>	<b>Finos (%)</b>
0,01	4,76	3,966	9,735

### 4.3 BORRACHA

A borracha natural é um polímero obtido da seiva da seringueira, árvore de origem amazónica que obteve uma rápida adaptação quando, na viragem do século, foi plantada com sucesso nas florestas tropicais asiáticas. Para a sua extracção são feitos pequenos cortes superficiais no caule da árvore, através dos quais o látex é captado. Depois de sua coagulação e secagem, este material é aquecido e posteriormente processado com outras substâncias químicas, transformando-se em borracha [76].

Neste trabalho foi utilizado pó de borrachas (DC-8000), produzidos a partir da reciclagem de pneus fornecidos pela empresa RECIPIEU.

As actuais sociedades de elevado conforto estão a descartar um pneu de cerca de 9 a 10kg, por habitante e por ano. Estes pneus não são um resíduo perigoso, mas a sua forma traz problemas sanitários e dificuldades importantes na sua disposição final. Além de que, se impropriamente armazenados, podem incendiar-se acidentalmente tornando-se num problema ambiental grave. O processamento deste resíduo é um dilema, já que o valor intrínseco dos bens que o constituem são altos, mas o seu aproveitamento cria dificuldades logísticas e tecnológicas que fazem com que os processos de reciclagem tenham custos elevados [76].

Um pneu é construído, basicamente, com uma mistura de borracha natural e de elastómeros (polímeros com propriedades físicas semelhantes às da borracha natural), também chamados de "borrachas sintéticas". A adição de negro de fumo (vulcanização) confere à borracha propriedades de resistência mecânica e à acção dos raios ultra-

violeta, durabilidade e desempenho. O processo de vulcanização faz com que o reaproveitamento dos seus constituintes originais seja impossível, quer pela impossibilidade de reverter o processo de vulcanização quer pela impossibilidade de separar da matriz molecular criada os restantes componentes. Esta dificuldade é acrescida dada a disparidade das naturezas dos materiais utilizados no fabrico do pneu [76].

Não havendo interesse comercial na reciclagem de pneus usados, estes passaram a ser amontoados em enormes depósitos. Alguns depósitos atingiram milhões de pneus em pilhas, ao ar livre. Estes depósitos introduzem graves problemas de saúde pública. Primeiro porque, quando expostos ao ar livre, armazenam pequenas poças de água das chuvas no seu interior. Essas pequenas poças de água são ótimas para a procriação e multiplicação de mosquitos. Segundo porque, em caso de incêndio das pilhas, os fogos criados são muito difíceis de extinguir e têm graves consequências ambientais. A queima de pneus ao ar livre é de evitar pois dada a complexa composição química, essencialmente compostos de carbono orgânico com enxofre e com presença de cloro ou bromo, a combustão não controlada a baixas temperaturas leva à formação de compostos extremamente tóxicos como, por exemplo, as dioxinas. Acresce ainda a elevadíssima quantidade de matéria particulada, (Figura 4.7), que se liberta dado a combustão ser incompleta. Aquando da combustão dos pneus há libertação de óleos, que, espalhados no solo e aquíferos, têm grande potencial poluente [76].



*Figura 4.7 - Fogo em pilha de pneus durante o Verão de 1999. Em Stanislaus, EUA [76].*

Por estes motivos, quer a queima a céu aberto quer a deposição ao ar livre, têm estado a ser proibidas por todo o mundo. A eliminação de pneus por deposição em aterros sanitários também não é aconselhável porque, dada a sua forma de toróide oco, ocupa muito espaço e cria problemas de estabilidade nos aterros que não podem ser compactados convenientemente. Em consequência a deposição em aterro de pneus inteiros também está a ser proibida, e a tendência é proibir a sua deposição ainda que triturados. Na Europa a deposição em aterro já é proibida pela Directiva do Conselho 1999/31/CE de 26 de Abril. Sendo a indústria de pneus o principal consumidor de borracha e não sendo possível uma reutilização em pneus novos por questões de segurança, resta pouco mais mercado onde reincorporar os reciclados. Isto é, se 65% dos pneus forem reciclados, como se pretende, e admitindo que os pneus novos poderão vir a ser produzidos com incorporação de 10% de borracha reciclada sobram aproximadamente cerca de 50% de reciclados. Estes 50% de reciclados representam 30% do total do consumo de borracha, já que os pneus são responsáveis por 60% do consumo actual de borracha. Esses 50% de reciclados são quase tanto como todo o consumo de borracha não utilizada em pneus [76].

Dado que quase todos os pneus reutilizados ou recauchutados, mais tarde ou mais cedo terão de ser reciclados ou valorizados, importa desenvolver produtos e métodos que permitam o maior aproveitamento e rentabilidade dos reciclados. De preferência métodos que permitam aproveitar ao máximo as notáveis propriedades dos compostos de borracha que constituem os pneus.

No presente trabalho apresenta-se uma forma de reutilizar este tipo de matéria-prima para criar um atractivo material de construção pois, independentemente da abordagem legal adoptada, a melhor forma de evitar o abandono de pneus descartados é conseguir que os produtos resultantes da reciclagem material sejam atractivos para os consumidores.

#### **4.3.1 PROCESSO DE TRATAMENTO DOS GRANULADOS DE BORRACHA**

O ponto de partida para a reciclagem material é, como em todas as indústrias, uma fonte de fluxo contínuo de matérias-primas. Qualquer indústria instalada a jusante da utilização de pneus tem de ter assegurado o fornecimento em condições homogêneas de

matéria-prima para a sua laboração. Em Portugal os pneus usados são, na maioria dos casos, deixados nas oficinas dos distribuidores de pneus aquando da substituição de um pneu usado por um pneu novo. O distribuidor tem de entregar estes pneus num ponto de recolha, onde são triados e separados para os seus destinos: recauchutagem; reciclagem ou valorização energética [76].

Reciclagem entende-se valorização material do pneu, isto é a reciclagem dos seus materiais. Na prática, em Portugal designa-se por reciclagem a moagem dos pneus para produção do granulado de borracha, também designado por pó de pneu ou, ainda, pó de borracha. Nas unidades recicladoras encontra-se a RECIPNEU em Sines. A RECIPNEU usa a tecnologia de moagem por arrefecimento criogénico (Figura4.8).



Figura 4.8 - Processo-tipo de reciclagem criogénica [76]

Os pneus são recebidos inteiros e podem ter de ser submetidos a uma limpeza prévia de materiais que os acompanhem e que possam danificar os equipamentos trituradores, tais como pedras ou peças metálicas. Podem ser ainda separados de acordo com a sua natureza, em especial: pneus ligeiros ou de turismo e pneus pesados. A composição é ligeiramente diferente, os pneus ligeiros têm menos borracha natural, menos metal e mais têxtil do que os pneus pesados. Mas, sobretudo, é significativa a diferença de dimensões e de massa por unidade. Após a limpeza os pneus são triturados, rasgados, em bocados de grandes dimensões, chamados chips. Aos pneus pesados pode ser extraído o talão antes desta primeira operação de trituração. Estes chips são depois

encaminhados para moinhos e, posteriormente, crivados para separar os grânulos pelas diferentes dimensões. No processo criogénico os chips são arrefecidos por azoto líquido, tornando a borracha mais frágil, o que facilita a trituração e permite a obtenção de grânulos mais pequenos e regulares. Com a borracha mais frágil a trituração é feita por moinho de martelos, isto é no processo criogénico as partículas são quebradas, enquanto que no processo à temperatura ambiente as partículas são “rasgadas”. Esta diferença faz com que as partículas obtidas criogenicamente tenham formas mais regulares. Consegue-se uma distribuição de tamanhos com maior proporção de partículas pequenas no processo criogénico. As partículas obtidas por criogenia têm um aroma menos intenso, “sujam” menos e são mais apropriadas para incorporação em tintas ou utilizações nas quais seja necessária a passagem por orifícios estreitos tal como em pulverizações. Antes, ou durante a crivagem são separados os metais por processos magnéticos e os têxteis por processos gravimétricos recorrendo ao ar ventilado.

Apresenta-se na Figura 4.9 o aspecto do produto final e na Tabela 4.6 as características das borrachas fornecidas pelo fabricante [77].



*Figura 4.9 – Aspecto do produto final da borracha DC-8000.*

Tabela 4.6 – Características da borracha DC8000.

<b>Descrição química</b>	Borracha de pneu vulcanizada
<b>Densidade a granel</b>	0,38 ± 0,03 (Kg/dm <sup>3</sup> )
<b>Forma física</b>	Partículas tipo cubóide
<b>Tamanho nominal</b>	<0,25 mm

### 4.3.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A caracterização granulométrica da borracha foi efectuada através da peneiração de 200 gramas de pó de borracha DC-8000, segundo a norma NP EN 933-1 2000-Parte 1 [75]. Na Tabela 4.7 apresenta-se o resultado da análise granulométrica e na Figura 4.10 apresenta-se a curva granulométrica do granulado de borracha utilizado.

Tabela 4.7 – Percentagens de material passado e retido em cada peneiro (Pó de Borracha DC8000)

<b>Peneiros</b>	<b>Malha</b>	<b>Massa Retida (g)</b>	<b>% Retido</b>	<b>% Retido acumulado</b>	<b>% Total que passa</b>	<b>% Total retido</b>
Nº 4	4,76	0	0	0	100	0
Nº 8	2,38	0	0	0	100	0
Nº 16	1,19	0	0	0	100	0
Nº 30	0,595	0	0	0	100	0
Nº 50	0,297	45,14	22,57	22,57	77,43	22,57
Nº 100	0,149	112,95	56,48	79,05	20,95	79,05
Nº 200	0,075	38,23	19,12	98,16	1,84	98,16
refugo	0,01	3,68	1,84	100	0	100
Módulo de Finura						3,01

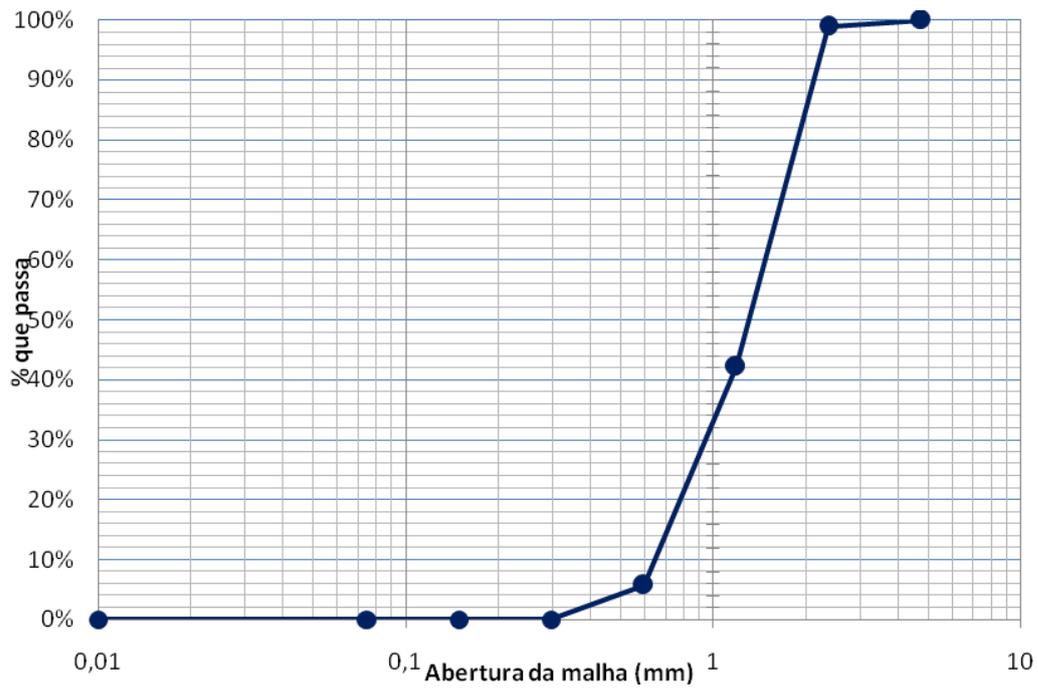


Figura 4.10 – Curva Granulométrica do pó de borracha DC8000.

Da análise granulométrica analisaram-se quatro parâmetros (Tabela 4.8): Módulo de finura, máxima dimensão, mínima dimensão e percentagem de material que passa no peneiro 0,075mm.

Tabela 4.8 – Parâmetros caracterizados na análise granulométrica do pó de borracha DC8000.

<b>d</b>	<b>D</b>	<b>Módulo de Finura</b>	<b>Finos (%)</b>
0,149	0,595	3,01	1,84



## Capítulo 5

### PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

No presente capítulo apresentam-se os estudos de durabilidade efectuados de modo a avaliar o comportamento das argamassas poliméricas de agregados leves face a agentes ambientais e químicos. Para isso, foram moldados provetes de resina MC-DUR1390 VK e ICOSIT KC 220/60 com pó de cortiça e pó de borracha DC-8000.

O teste de ataque em ácido sulfúrico consistiu em efectuar ciclos de molhagem-secagem neste ácido a provetes de MC-DUR1390 VK com pó de borracha DC-8000 em várias concentrações de ácido sulfúrico e avaliar a perda de massa do material. O teste de ataque em ácido fórmico consistiu em efectuar ciclos de molhagem-secagem a provetes cúbicos MC85DC, MC85A, IC95DC e IC95A em ácido fórmico a uma concentração de 10%, sendo no final dos ciclos ensaiados à compressão.

O teste de degradação na câmara climática consistiu em colocar os provetes numa câmara climática e sujeitá-los a ciclos de temperatura e imersão em água salgada sendo posteriormente estudado o seu comportamento mecânico através da realização de ensaios de tracção por flexão e compressão monotónica.

#### 5.1 PREPARAÇÃO DOS MODELOS

Para realizar esta investigação várias formulações foram preparadas através da mistura de agregados com resinas epoxídicas. Os agregados utilizados foram pó de cortiça e pó de borracha,

Os sistemas de resina epoxídica utilizados foram MC-DUR1390 VK e ICOSIT KC 220/60, sendo processados com um rácio de mistura de 3:1 e 2,75:2,25, respectivamente, com o endurecedor, que foram misturadas com pó de cortiça (A) e pó de borracha DC-8000 (DC). A quantidade de resina utilizada foi de 85% em peso. Foram estudados assim quatro formulações de argamassa polimérica, onde foram usadas diferentes tipos de resina epoxídica e/ou agregado.

Com estas formulações, foram executados provetes prismáticos prismáticos ( $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ ), conforme ilustrado na Figura 5.1, de acordo com a norma NP EN 196-1:2006 [78]. Todos os provetes foram curados durante 24h à temperatura ambiente e, em seguida foram deixados a curar numa estufa a uma temperatura de 40 °C durante 7 dias.



*Figura 5.1 – Alguns provetes depois da moldagem.*

## **5.2 ENSAIOS DE DURABILIDADE**

### **5.2.1 CICLOS DE MOLHAGEM-SECAGEM EM AMBIENTE SALINO**

No sentido de ultrapassar a necessidade de disponibilidade diária de um experimentador durante o período de tempo necessário para decorrer a experiência, optou-se por utilizar uma câmara climática (Figura 5.2) desenvolvida no âmbito da tese de Ludovico Marques [79] que permite realizar ciclos de imersão e secagem à temperatura pretendida de forma automática.



*Figura 5.2 – Câmara climática de envelhecimento artificial.*

No interior da câmara climática foram colocados dois tabuleiros em acrílico (Figura 5.3), cada um com capacidade para 12 provetes de  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ , ficando cada tabuleiro com provetes de argamassa do mesmo tipo de resina epoxídica (Figura 5.4). No fundo do tabuleiro existem duas aberturas, uma para a entrada e saída de água e outra com um tubo de controlo de nível de água. Estas aberturas encontram-se ligadas aos reservatórios de água salgada por um sistema de tubos, que se ligam aos tabuleiros por um sistema de conexões.



*Figura 5.3 – Tabuleiros no interior da câmara climática.*



*Figura 5.4 – Pormenor dos provetes no interior dos tabuleiros de acrílico*

Os provetes colocados nos tabuleiros encontram-se sobre um suporte adequado de modo a não ficarem em contacto directo com o fundo do tabuleiro, por isso, uma vez escoada a solução dos tabuleiros, os provetes começam a escorrê-la para o fundo destes e, devido a uma ligeira inclinação dada aos tabuleiros no interior da câmara, a água esco naturalmente para a abertura de saída da água. Teve-se igualmente atenção para o facto de os provetes não poderem entrar em contacto uns com os outros.

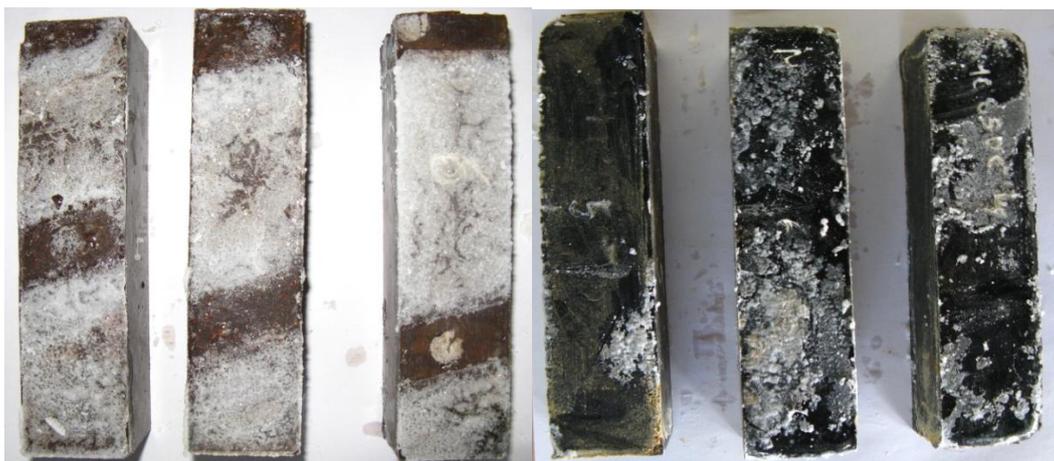
A concentração de sal utilizada foi de 10% (cerca de 3x a concentração da água do mar) e adoptaram-se os mesmos ciclos automáticos de imersão realizados por Ludovico Marques [79], de 2 horas em água salgada (Figura 5.5), 20 horas de secagem a 50 °C e

arrefecimento à temperatura ambiente durante 2 horas, perfazendo assim um ciclo com a duração de 24 horas.



*Figura 5.5 – Pormenor do enchimento dos tabuleiros durante os ciclos de imersão no interior da câmara climática.*

Os provetes foram retirados aos 60 ciclos e aos 120 ciclos (Figura 5.6) tendo sido deixados a secar numa estufa a 40°C durante 7 dias sendo posteriormente pesados, a fim de calcular a perda de massa, antes de avaliar o seu comportamento mecânico através de ensaios de tracção por flexão e de compressão.



*Figura 5.6 – Alguns provetes logo após serem retirados da estufa no final dos ciclos.*

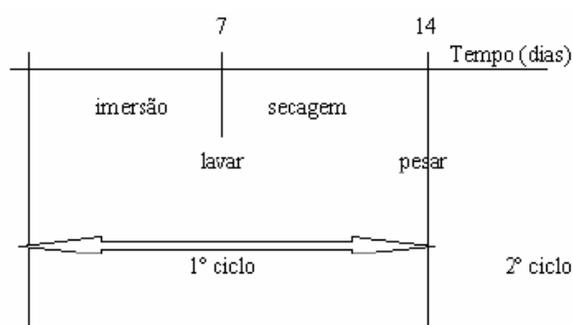
## 5.2.2 CICLOS DE MOLHAGEM-SECAGEM EM AMBIENTE ÁCIDO

### 5.2.2.1 ÁCIDO SULFÚRICO

O método de ensaio utilizado para avaliar a degradação provocada pelo ácido sulfúrico segue o procedimento apresentado pela norma ASTM D 543 – 95 [80]. Após moldar os provetes de resina MC-DUR com borracha DC-8000, cortou-se um em 16 partes iguais, ficando desta forma com 16 provetes de dimensões aproximadas de 40x40x10mm<sup>3</sup>.

Cada ciclo de exposição consistiu na imersão dos provetes durante 7 dias numa solução de ácido sulfúrico seguido de um período de secagem de 7 dias numa estufa a 40°C. Foram realizados 5 ciclos de exposição. A norma ASTM D 543 – 95 [80] preconiza que os provetes mais densos que a solução, como é o caso, não devem tocar no fundo do recipiente onde são colocados pelo que se colocou um suporte devido de modo a impedir este tipo de contacto. Os recipientes onde se colocaram os provetes foram selados de modo a não ocorrer evaporação da solução ácida.

Os provetes foram pesados antes do início de cada ciclo de teste. Após o ciclo de imersão, os provetes foram lavados com água destilada e depois por água pressurizada, a fim de remover quaisquer produtos corrosivos da sua superfície e simular o efeito da abrasão mecânica. Os provetes foram colocados a secar numa atmosfera controlada de laboratório durante 7 dias. No fim do ciclo de secagem, os provetes foram novamente pesados completando assim o ciclo de 14 dias (Figura 5.7).



*Figura 5.7 – Diagrama esquemático de um ciclo de degradação pela acção do ácido sulfúrico.*

No final de cada ciclo, a solução do agente agressivo foi substituída por uma nova solução. Para a determinação da percentagem de perda de massa dos provetes utilizou-se a seguinte expressão:

$$\% \text{ perda de massa} = \frac{m_{\text{inicial}} - m_{\text{final}}}{m_{\text{inicial}}} \times 100 \quad (5.1)$$

As concentrações de ácido sulfúrico usadas foram de 5, 10, 15, 20 e 30% e o volume de solução somou 3 vezes o volume dos provetes. Cada recipiente continha 3 provetes imersos numa concentração diferente de ácido (Figura 5.8).



*Figura 5.8 – Exemplo de provetes imersos numa solução de ácido sulfúrico.*

### 5.2.2.2 ÁCIDO FÓRMICO

O estudo efectuado por Reis, J. M. L. [63], permitiu concluir que o ácido que mais afectou o betão polimérico, tanto em perda de massa, como em perda de resistência foi o ácido fórmico.

Na sequência deste estudo, utilizaram-se provetes de dimensões 40x40x40mm de resina MC com 15% em peso de cortiça e borracha. Complementarmente, para avaliar o comportamento de outro tipo de resina, utilizaram-se provetes de resina IC com 5% em peso de cortiça e borracha DC8000, já existentes no laboratório, de modo a poder ser avaliado o comportamento de provetes de resina IC neste tipo de ambiente.

Cada ciclo de exposição consistiu em imergir os provetes numa solução de ácido fórmico durante 7 dias sendo posteriormente deixados a secar numa estufa a 40 °C durante 7 dias. Os provetes foram pesados no início de cada ciclo de modo a avaliar a perda de massa. Foram programados 5 ciclos de exposição. Após o ciclo de imersão, os provetes foram lavados com água destilada e depois por água pressurizada, a fim de remover quaisquer produtos corrosivos da sua superfície e simular o efeito da abrasão mecânica

Para além de os provetes terem de estar apoiados na sua base por forma a não tocarem no fundo do recipiente, a norma ASTM D 543 – 95 [80] preconiza que em provetes menos densos que a água, como é o caso dos provetes de cortiça, deve-se colocar um peso sobre os mesmos para impedir que flutuem.

Os provetes foram colocados num recipiente fechado de modo a não ocorrer evaporação da solução (Figura 5.9). A concentração de ácido fórmico aplicada foi de 10% e a solução somou 4x o volume total dos provetes. Após os ciclos de exposição terminarem, os provetes foram ensaiados à compressão monotónica.



*Figura 5.9 – Provetes imersos na solução de ácido fórmico.*

### **5.3 ENSAIOS DE AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA**

#### **5.3.1 RESISTÊNCIA À TRACÇÃO POR FLEXÃO**

O objectivo deste ensaio é a caracterização do comportamento à flexão dos provetes em estudo, com vista à determinação da resistência à tracção em flexão, o módulo de

elasticidade à flexão e outros parâmetros da relação tensão-extensão, como a extensão e tensão na rotura.

Os ensaios de resistência à tracção por flexão em três pontos foram efectuados numa máquina Zwick Z050, equipada com uma célula de carga de 50 kN do Laboratório de Ensaio mecânicos do Departamento de Engenharia Civil (Figura 5.10).



Figura 5.10 – Pormenores do ensaio à tracção por flexão.

Os ensaios foram realizados com controlo de força. O vão utilizado foi de 10 cm e a velocidade da célula de carga foi de 16 N/s.

A medição do deslocamento a meio vão e da força aplicada permite estimar as propriedades acima referidas, pela aplicação das expressões da teoria da elasticidade.

A resistência à tracção por flexão foi calculada utilizando a seguinte expressão:

$$\sigma_t = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (5.2)$$

Em que:

$\sigma$  é a resistência à tracção por flexão, obtida a meio vão do provete, em MPa;

P é a carga máxima obtida na vizinhança da rotura, em N;

L é o comprimento do provete entre apoios, em mm;

B é a largura do provete, em mm;

D é a altura do provete, em mm.

O cálculo da extensão foi feito recorrendo à expressão de Chastre Rodrigues e Silva [23], que permite obter os valores da extensão ( $\varepsilon$ ) a partir da flecha medida no provete ( $\delta_v$ ), sendo d a espessura do provete e L o comprimento do vão entre apoios. Assim vem que:

$$\varepsilon = \frac{6\delta_v d}{L^2} \quad (5.3)$$

### 5.3.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MONOTÓNICA

Devido ao facto de a rotura dos provetes no ensaio à tracção por flexão ser a meio, é possível aproveitar as duas metades resultantes deste ensaio para efectuar os ensaios à compressão. Deste modo, cada metade do provete ensaiado à tracção foi cortada, de modo a obter provetes de dimensões 40x40x40 mm.

Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados no Laboratório de Estruturas pesadas da UNL, numa prensa servo controlada da marca Seidner, modelo 3000 D com capacidade de carga até 3000 kN e um curso do êmbolo de 50 mm.

A recolha dos dados foi efectuada através de um datalogger Spider 8 com capacidade para 8 canais e o software utilizado foi o Catman 4.0 da HBM (Figura 5.11).



*Figura 5.11 – Pormenores do ensaio à compressão monotónica.*

O procedimento experimental consistiu no carregamento dos provetes até a ser atingida uma deformação vertical de 35%. Para a medição dos deslocamentos verticais nos provetes ensaiados, foram usados 4 deflectómetros, cada um com um curso de 100 mm. Os ensaios foram realizados com controlo de deslocamento vertical e a velocidade foi de 20  $\mu\text{m/s}$ .

A tensão foi calculada a partir da seguinte expressão:

$$\sigma_c = \frac{F}{A_0} \quad (5.4)$$

Em que  $F$  é a Força aplicada e  $A_0$  é a área da secção inicial do provete onde é directamente aplicada a carga.

## Capítulo 6

### ANÁLISE DE RESULTADOS

Apresentam-se neste capítulo os resultados dos diversos ensaios realizados com a finalidade de melhor conhecer os seus efeitos nas propriedades do material em estudo. Para avaliar o nível de degradação induzido através do ensaio de molhagem-secagem em ambiente salino, são apresentados os valores de perda de massa dos diversos provetes aos 60 e 120 ciclos. Os resultados dos ensaios à tracção por flexão e compressão monotónica são apresentados em 6.1.2 e 6.1.3, respectivamente. Estes resultados incluem gráficos tensão-deformação, assim como a evolução da tensão de rotura, perda de resistência, evolução do módulo de elasticidade e decréscimo do módulo de elasticidade ao longo dos ciclos.

No estudo da degradação devido à imersão em ácido sulfúrico, é apresentada a evolução da perda de massa de provetes MC85DC ao longo dos vários ciclos de imersão neste ácido com diferentes concentrações. No estudo da degradação devido à imersão em ácido fórmico são apresentados os valores de evolução da massa ao longo dos ciclos, assim como os resultados dos ensaios à compressão monotónica efectuados.

## 6.1 ENVELHECIMENTO ARTIFICIAL ATRAVÉS DE CICLOS DE MOLHAGEM-SECAGEM EM AMBIENTE SALINO

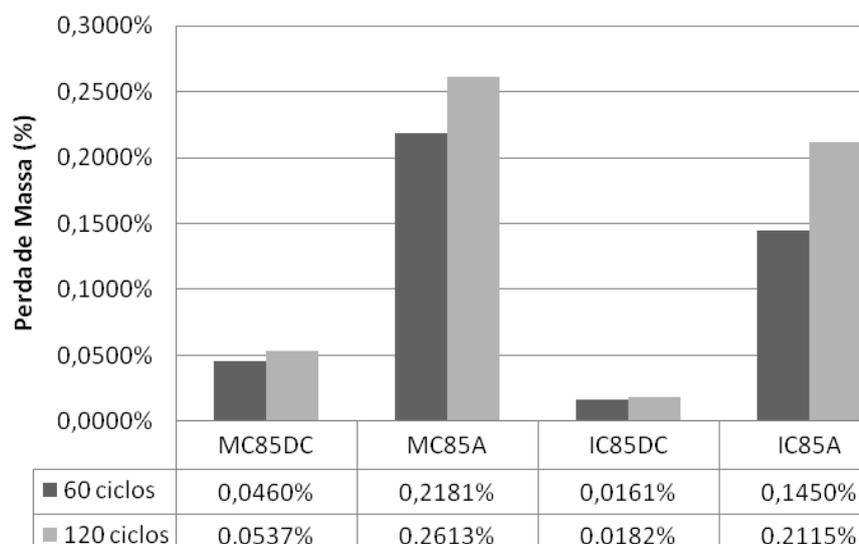
### 6.1.1 AVALIAÇÃO DA PERDA DE MASSA

Nos ciclos de molhagem-secagem em ambiente salino os provetes foram ensaiados de acordo com o procedimento experimental descrito no capítulo 5

Para analisar a perda de massa dos provetes retiraram-se os provetes a câmara climática no final dos ciclos e colocaram-se a secar numa estufa a 40°C durante 7 dias. Após serem retirados da estufa, estes foram pesados a fim de calcular a perda de massa. Apresenta-se na Tabela 6.1 os valores obtidos para a massa dos provetes sujeitos à degradação do interior da câmara climática. Complementarmente, apresenta-se na Tabela 6.1 valores comparativos do valor médio da perda de massa, em percentagem, para todos os materiais, aos 60 e aos 120 ciclos.

*Tabela 6.1 – Massa dos vários provetes aos 0, 60 e 120 ciclos.*

<b>proвете</b>	<b>0 ciclos</b>	<b>60 ciclos</b>	<b>proвете</b>	<b>0 ciclos</b>	<b>120 ciclos</b>
MC85DC-1 60	281,35	281,27	MC85DC-1 120	283,66	283,51
MC85DC-2 60	281,20	281,02	MC85DC-2 120	278,81	278,71
MC85DC-3 60	284,91	284,78	MC85DC-3 120	276,25	276,05
MC85A-1 60	258,75	258,01	MC85A-1 120	255,48	255,36
MC85A-2 60	261,39	260,99	MC85A-2 120	249,99	249,24
MC85A-3 60	249,98	249,44	MC85A-3 120	248,54	247,44
IC85DC-1 60	334,92	334,82	IC85DC-1 120	335,08	334,91
IC85DC-2 60	334,49	334,46	IC85DC-2 120	317,18	317,18
IC85DC-3 60	322,57	322,54	IC85DC-3 120	335,50	335,49
IC85A-1 60	292,16	291,99	IC85A-1 120	313,76	312,99
IC85A-2 60	299,17	298,65	IC85A-2 120	302,40	301,79
IC85A-3 60	298,55	297,95	IC85A-3 120	301,31	300,75



*Figura 6.1 – Perda de massa (%) aos 60 e aos 120 ciclos.*

Comparando as diferentes massas dos provetes às zero horas de envelhecimento, verifica-se que os provetes com pó cortiça possuem uma massa menor que os provetes com pó borracha, para ambos os tipos de resina utilizadas. Comparando os dois tipos de resina, observa-se que os provetes de resina IC possuem maior massa que os análogos com resina MC.

Constata-se da análise da Figura e das Tabelas que todos os provetes sofreram uma perda de massa muito pouco significativa, apresentando uma perda de massa máxima de 0,26% para os provetes MC85A retirados aos 120 ciclos. Apesar dos valores de perda de massa serem muito reduzidos, observa-se que todos os provetes retirados aos 120 ciclos apresentaram uma perda de massa superior que os provetes retirados aos 60 ciclos.

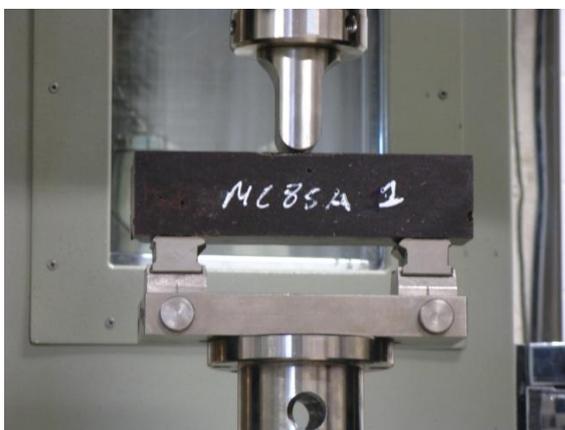
Comparando o comportamento dos vários materiais, observa-se que os provetes com borracha DC8000, para ambas as resinas, sofreram uma perda de massa inferior aos provetes com cortiça. Relativamente à perda de massa entre os dois tipos de resina, verifica-se que os provetes com resina IC apresentam perdas de massa inferiores aos provetes com resina MC-DUR 1390 VK, quer para os provetes com borracha, quer para os com cortiça.

### 6.1.2 ENSAIOS DE TRACÇÃO POR FLEXÃO

Apresentam-se nas Figuras 6.2 e 6.3 os modos de rotura à flexão dos provetes com resina MC e IC com pó de borracha e de cortiça. Os modos de rotura mantiveram-se iguais nos 0, 60 e 120 ciclos de envelhecimento através do procedimento de molhagem-secagem no ambiente salino utilizado.



a)



b)

Figura 6.2 - Pormenores de rotura à flexão dos provetes de resina MC-DUR 1390 VK:

a) Provetes MC85DC e b) Provetes MC85A.

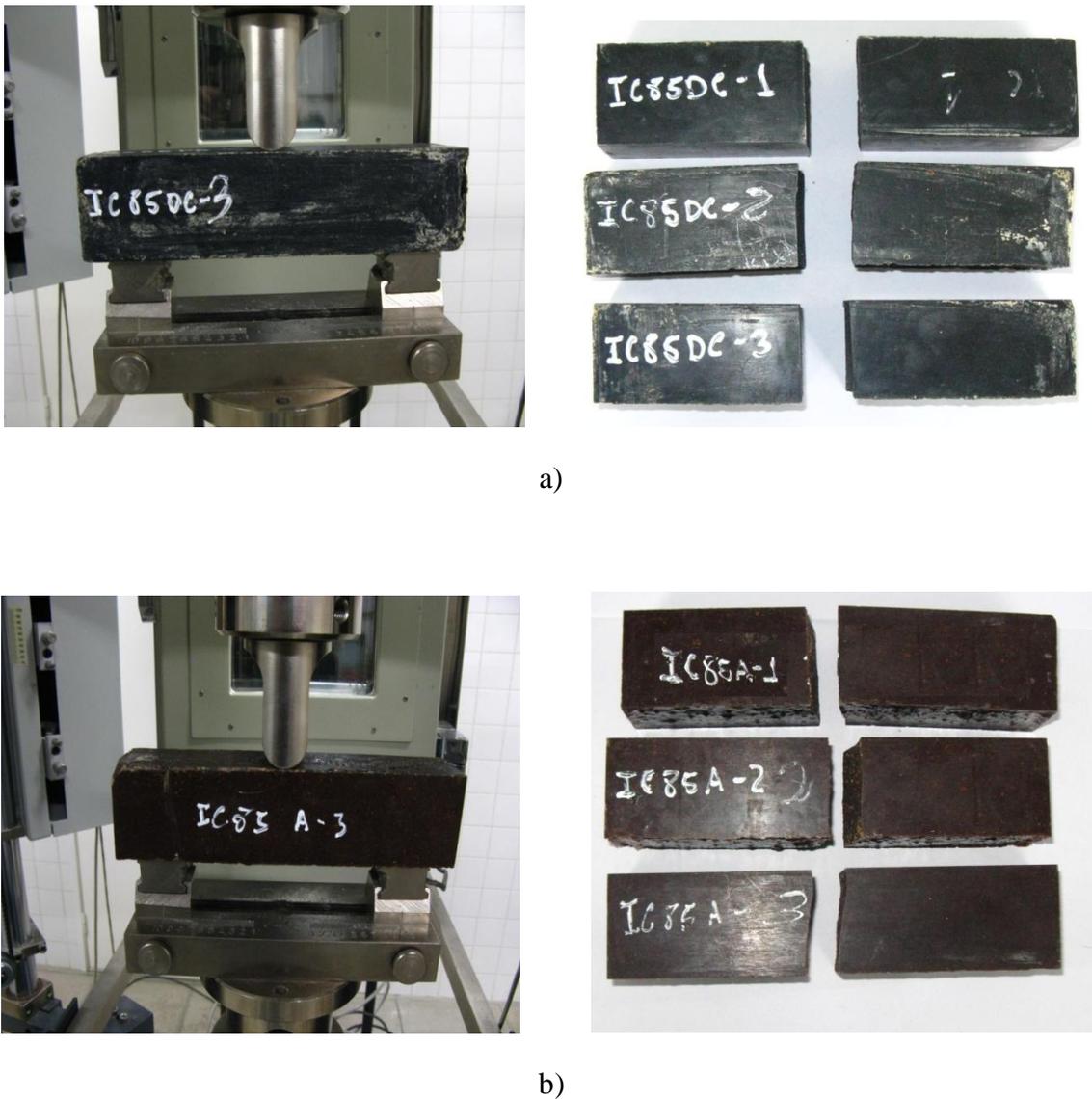


Figura 6.3 - Pormenores de rotura à flexão dos provetes de resina ICOSIT KC220/60:

a) Provetes IC85DC e b) Provetes IC85A.

Nas Figuras 6.4 a 6.7 apresentam-se os diagramas tensão – deformação dos ensaios de tracção por flexão, que serviram de base para a construção das Tabelas 6.2 a 6.4 nas quais se apresentam os valores, obtidos para cada provete da tensão de rotura à flexão ( $f_{pct}$ ), extensão na rotura ( $\varepsilon_{pct}$ ) e do módulo de elasticidade (E), respectivamente, dos provetes de controlo, que não sofreram degradação, e dos provetes retirados aos 60 e aos 120 ciclos. Complementarmente apresenta-se para cada uma destas grandezas o seu valor médio.

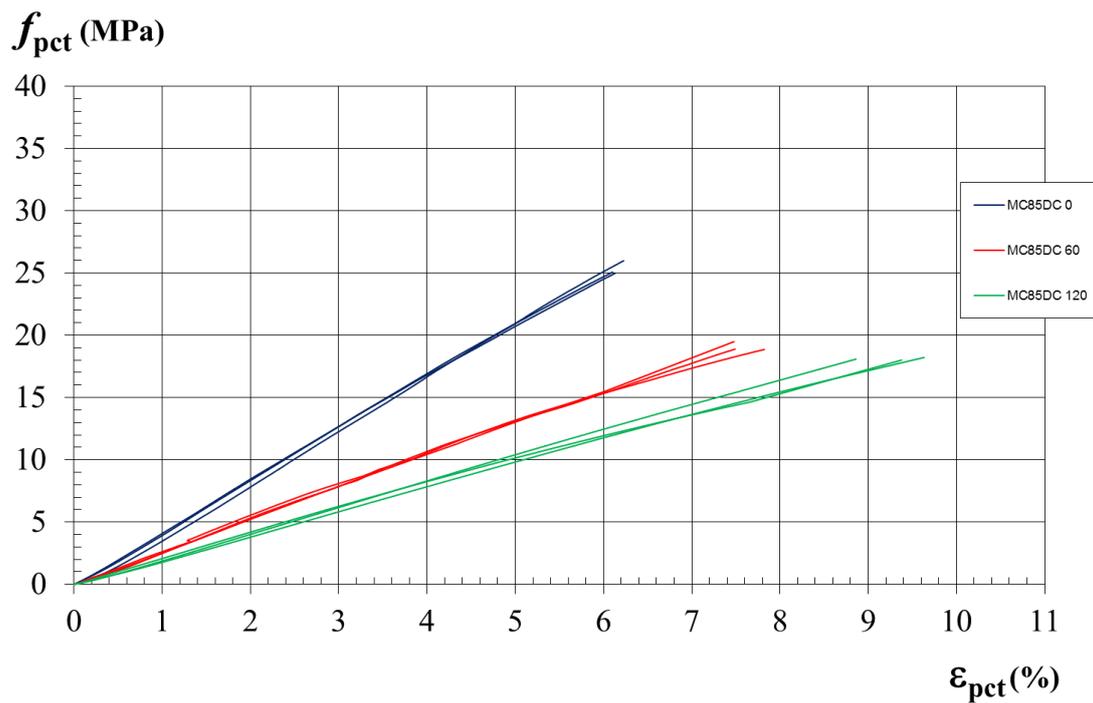


Figura 6.4 – Diagrama tensão-deformação do ensaio de flexão aos 0, 60 e 120 ciclos dos provetes MC85DC.

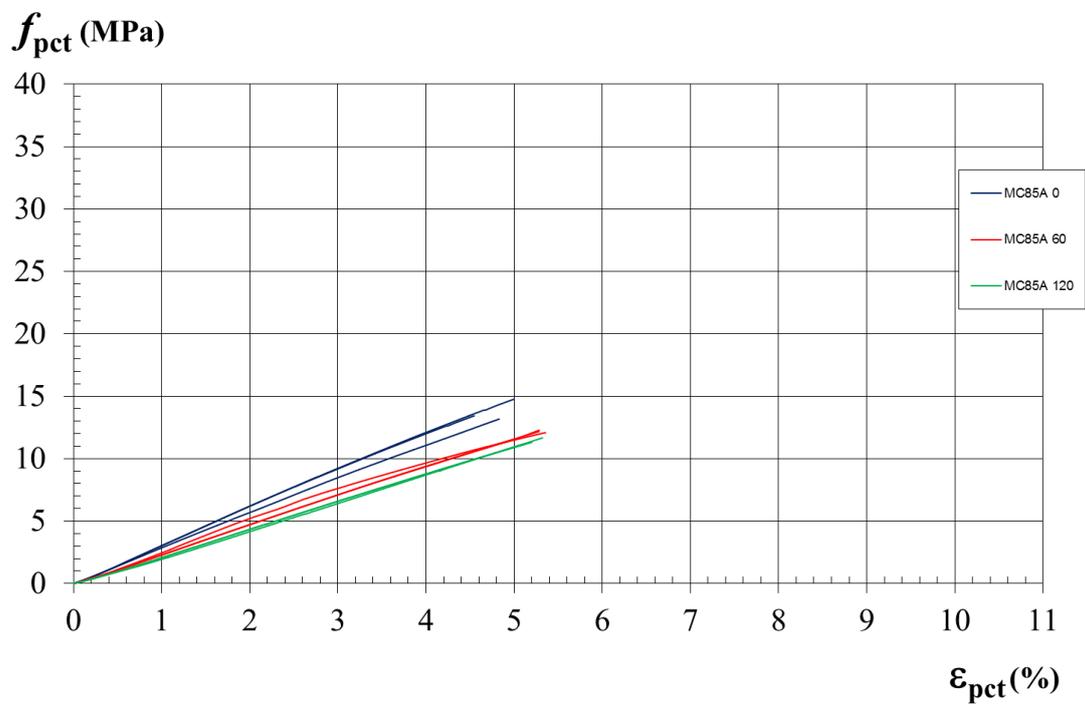


Figura 6.5 – Diagrama tensão-deformação do ensaio de flexão aos 0, 60 e 120 ciclos dos provetes MC85A.

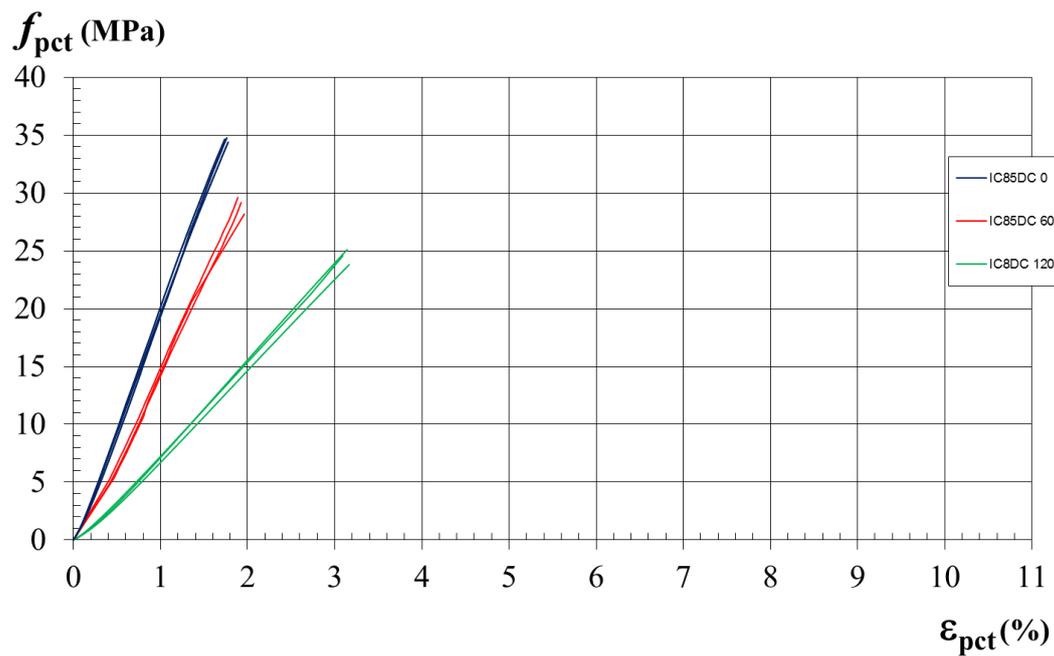


Figura 6.6 – Diagrama tensão-deformação do ensaio de flexão aos 0, 60 e 120 ciclos dos provetes IC85DC.

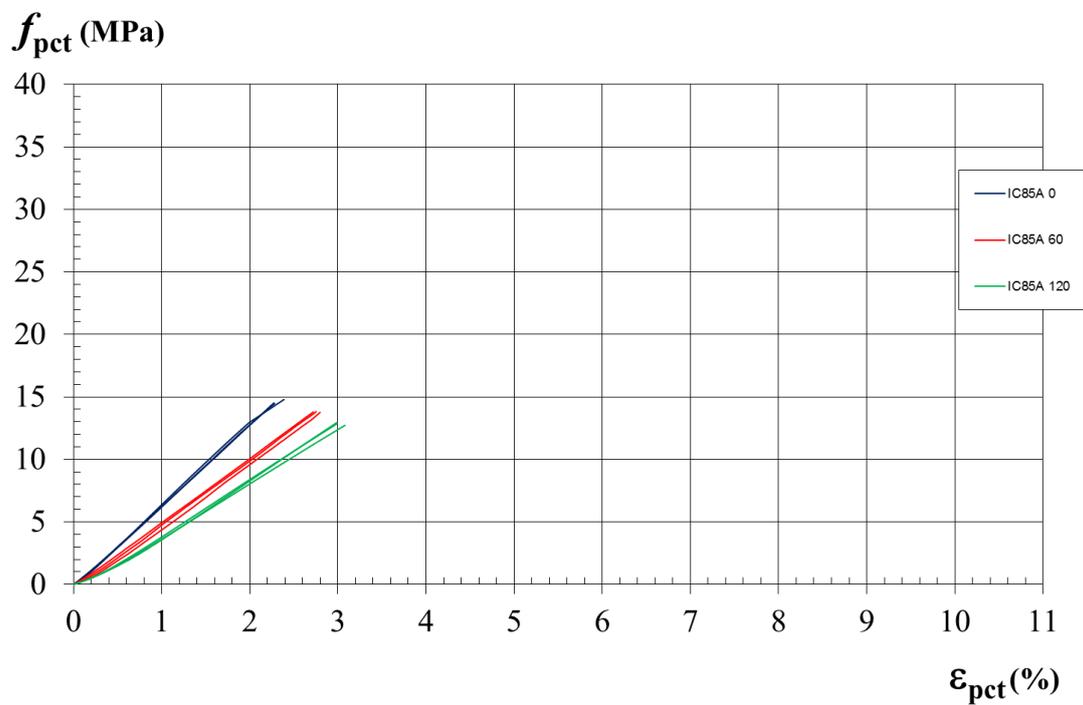


Figura 6.7 – Diagrama tensão-deformação do ensaio de flexão aos 0, 60 e 120 ciclos dos provetes IC85A.

Tabela 6.2 – Tensão de rotura à tracção por flexão aos 0, 60 e 120 ciclos dos provetes MC85DC, MC85A, IC85DC e IC85A.

	proвете	0 ciclos		60 ciclos		120 ciclos	
		$f_{pct,i}$ (MPa)	$f_{pct,m}$ (MPa)	$f_{pct,i}$ (MPa)	$f_{pct,m}$ (MPa)	$f_{pct,i}$ (MPa)	$f_{pct,m}$ (MPa)
Tensão de Rotura à Tracção por Flexão	MC85DC-1	26,0	25,3	18,9	19,1	18,2	18,1
	MC85DC-2	25,0		19,5		18,1	
	MC85DC-3	25,1		18,9		18,0	
	MC85A-1	13,4	13,8	12,2	12,2	11,3	11,4
	MC85A-2	13,2		12,2		11,2	
	MC85A-3	14,8		12,3		11,7	
	IC85DC-1	34,6	34,6	29,6	29,0	23,98	25,04
	IC85DC-2	34,4		29,2		25,21	
	IC85DC-3	34,8		28,2		25,94	
	IC85A-1	14,5	14,6	13,8	13,8	12,9	12,8
	IC85A-2	14,5		13,8		12,7	
	IC85A-3	14,8		13,8		12,9	

Tabela 6.3 – Extensão na rotura à tracção por flexão aos 0, 60 e 120 ciclos dos provetes MC85DC, MC85A, IC85DC e IC85A.

	proвете	0 ciclos		60 ciclos		120 ciclos	
		$\varepsilon_{pct,i}$ (%)	$\varepsilon_{pct,m}$ (%)	$\varepsilon_{pct,i}$ (%)	$\varepsilon_{pct,m}$ (%)	$\varepsilon_{pct,i}$ (%)	$\varepsilon_{pct,m}$ (%)
Extensão na Rotura	MC85DC-1	6,2	6,2	7,8	7,6	9,6	9,3
	MC85DC-2	6,1		7,5		8,9	
	MC85DC-3	6,1		7,5		9,4	
	MC85A-1	4,5	4,8	5,3	5,3	5,3	5,3
	MC85A-2	4,8		5,3		5,3	
	MC85A-3	5,0		5,3		5,4	
	IC85DC-1	1,7	1,8	1,9	1,9	3,2	3,1
	IC85DC-2	1,8		1,9		3,1	
	IC85DC-3	1,8		2,0		3,1	
	IC85A-1	2,3	2,3	2,7	2,8	3,0	3,0
	IC85A-2	2,3		2,8		3,1	
	IC85A-3	2,4		2,8		3,0	

Tabela 6.4 – Módulo de elasticidade à tracção por flexão aos 0, 60 e 120 ciclos dos provetes MC85DC, MC85A, IC85DC e IC85A.

	proвете	0 ciclos		60 ciclos		120 ciclos	
		$E_i$ (GPa)	$E_m$ (GPa)	$E_i$ (GPa)	$E_m$ (GPa)	$E_i$ (GPa)	$E_m$ (GPa)
<b>Módulo de Elasticidade</b>	MC85DC-1	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2
	MC85DC-2	0,4		0,3		0,2	
	MC85DC-3	0,4		0,3		0,2	
	MC85A-1	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2
	MC85A-2	0,3		0,3		0,2	
	MC85A-3	0,3		0,2		0,2	
	IC85DC-1	2,0	1,9	1,5	1,4	0,7	0,7
	IC85DC-2	1,9		1,4		0,7	
	IC85DC-3	1,8		1,2		0,7	
	IC85A-1	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4
	IC85A-2	0,6		0,5		0,4	
	IC85A-3	0,7		0,5		0,4	

Através dos dados fornecidos pela Tabela 6.2, construiu-se o gráfico da Figura 6.8 que apresenta a evolução dos valores de resistência à tracção por flexão dos diversos provetes ao longo dos ciclos do interior da câmara climática.

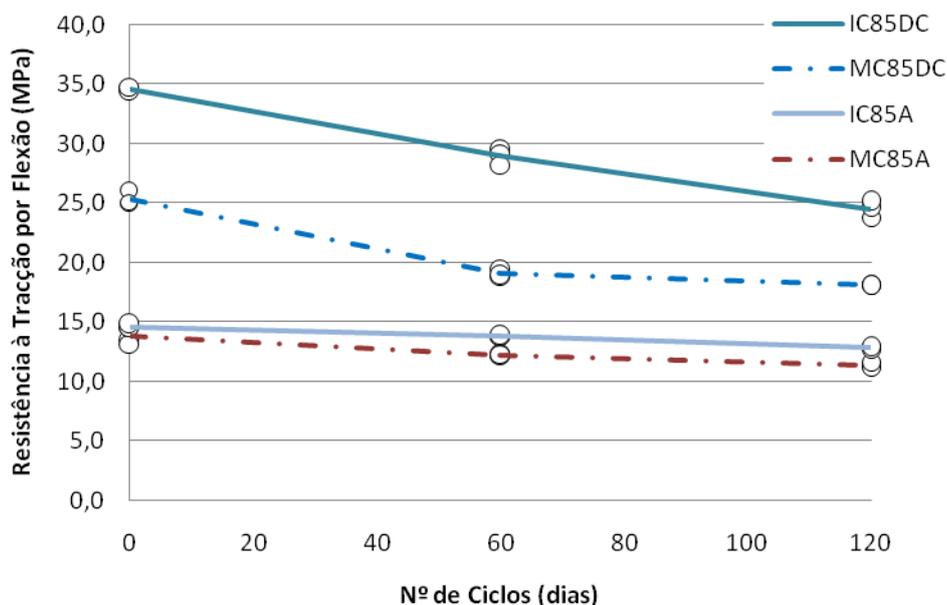
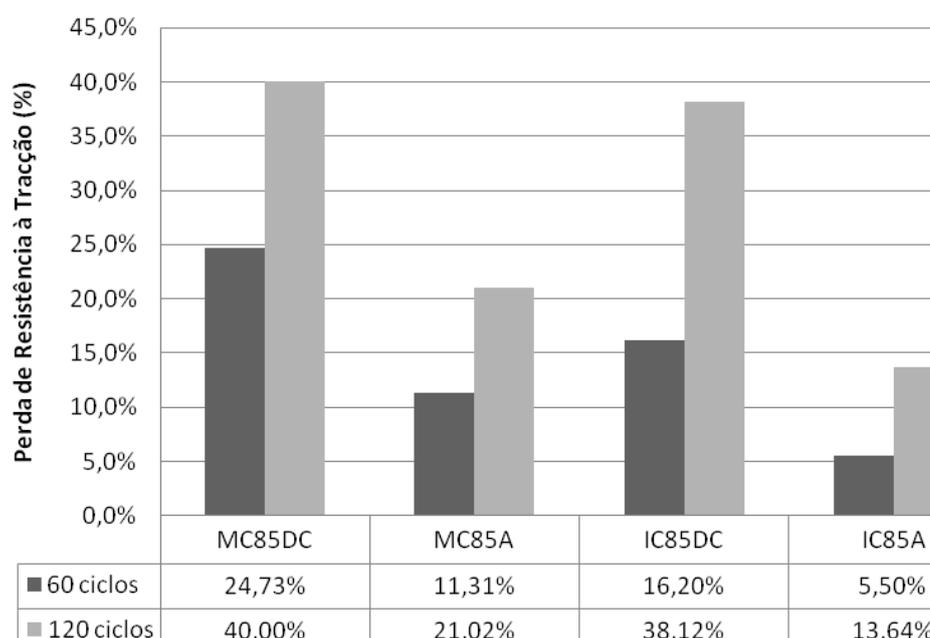


Figura 6.8 – Evolução da resistência à tracção por flexão ao longo dos ciclos estudados.

Pela análise da Tabela 6.2 e das Figuras 6.4 a 6.8, constata-se que os ciclos de molhagem-secagem em ambiente salino afectaram bastante a resistência dos provetes, notando-se uma redução elevada na resistência à tracção por flexão. Verificou-se uma perda de resistência bastante regular, na medida em que os provetes retirados aos 60 ciclos apresentaram valores de resistência à tracção inferiores aos provetes que não sofreram degradação, verificando-se uma evolução igual dos 60 para os 120 ciclos, tal como se observa na Figura 6.9.



*Figura 6.9 – Perda de resistência à tracção por flexão (%) aos 60 e aos 120 ciclos*

Da análise da Figura 6.9 constata-se que a maior perda de resistência à tracção por flexão ocorreu para os provetes MC85DC, atingindo 40% aos 120 ciclos, seguido dos provetes IC85DC que atingiram perdas na ordem dos 38%. A borracha DC8000 parece ser o agregado mais afectado pelos ciclos de temperatura com água salgada, pois a diferença entre a perda de resistência à tracção, aos 120 ciclos, dos provetes com este tipo de agregado quando comparados com os de cortiça, foi cerca do dobro para os provetes com resina MC e cerca do triplo para os provetes com resina IC. Apesar de a perda ser maior para os provetes com borracha, a resistência à tracção destes, quando comparados com os de cortiça foi sempre superior, para ambos os tipos de resina.

Comparando os dois tipos de resina, observou-se que os provetes com resina IC apresentaram valores inferiores de perda de resistência à tracção, quando comparados com os provetes com resina MC, quer para os provetes de cortiça como para os provetes de borracha. Apesar deste facto, verificou-se que a maior perda de resistência dos provetes com resina IC ocorreu dos 60 aos 120 ciclos, concluindo-se que, ao contrário do que se observa nos provetes de resina MC em que a maior queda na resistência ocorreu nos primeiros ciclos, para este tipo de resina a resistência à tracção é maioritariamente afectada nos ciclos finais.

Através dos dados fornecidos pela Tabela 6.3, construiu-se o gráfico da Figura 6.10 que apresenta a evolução do valor de extensão na rotura dos provetes ao longo dos ciclos. Complementarmente, apresenta-se na Figura 6.11 o aumento do valor da extensão na rotura dos provetes, em percentagem, obtidos aos 60 ciclos e aos 120 ciclos.

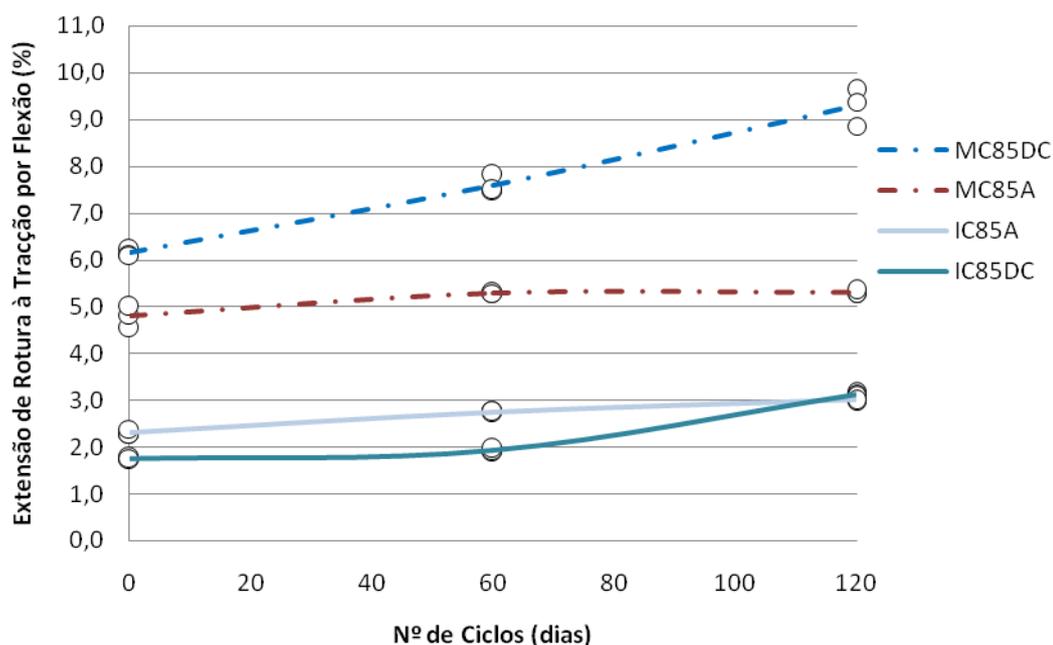
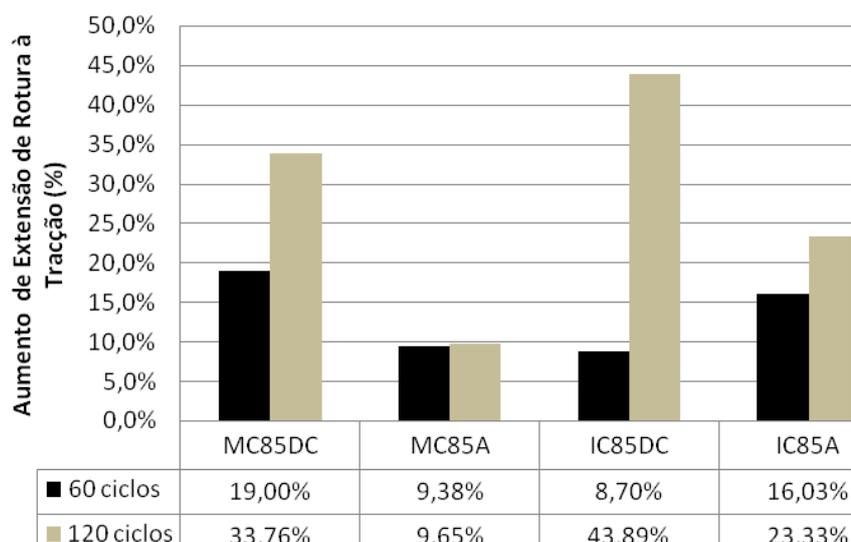


Figura 6.10 - Evolução da extensão na rotura de tracção por flexão ao longo dos ciclos estudados.



*Figura 6.11 -Aumento da extensão na rotura de tracção por flexão (%) aos 60 e aos 120 ciclos.*

Observando a Figura 6.11 retiram-se ilações acerca da evolução da extensão de rotura à tracção. Verifica-se um aumento do seu valor ao longo dos ciclos estudados, para todos os tipos de provetes, sendo que o maior aumento foi verificado nos provetes IC85DC, aumentando em cerca de 44% do seu valor inicial, aos 120 ciclos.

Comparando os dois tipos de agregados, constata-se pela Figura 6.11, que os provetes com borracha DC-8000 (MC85DC e IC85DC) foram os que registaram um maior aumento do valor de extensão de rotura à tracção, aos 120 ciclos, em cerca de 34% para os provetes de resina MC e cerca de 44% nos provetes de resina IC.

As maiores diferenças no valor de extensão de rotura à tracção dos provetes com cortiça foram observadas aos 60 ciclos, aumentando em cerca de 9% nos provetes de resina MC e cerca de 16% nos provetes com resina IC; dos 60 aos 120 ciclos observaram-se diferenças menos acentuadas: menos de 1% nos provetes de resina MC e cerca de 7% nos provetes de resina IC. Esta relação não ocorreu nos provetes de borracha DC-8000, em que o maior aumento do valor de extensão na rotura dos provetes MC85DC ocorreu nos primeiros 60 ciclos, ao invés do observado nos provetes IC85DC em que o maior aumento ocorreu entre os 60 e os 120 ciclos, existindo uma diferença de cerca de 35% do valor observado de extensão de rotura neste período.

Comparando os dois tipos de resina, da análise da Figura, constata-se que os provetes de resina ICOSIT KC 220/60 tiveram sempre um maior aumento do valor de extensão de rotura que os análogos em resina MC-DUR 1390 VK, com excepção para os provetes IC85DC, aos 60 ciclos.

Através dos dados fornecidos pela Tabela 6.4 retratou-se na Figura 6.12 a evolução do módulo de elasticidade ao longo dos ciclos e na Figura 6.13 o decréscimo do módulo de elasticidade, em percentagem, aos 60 e aos 120 ciclos.

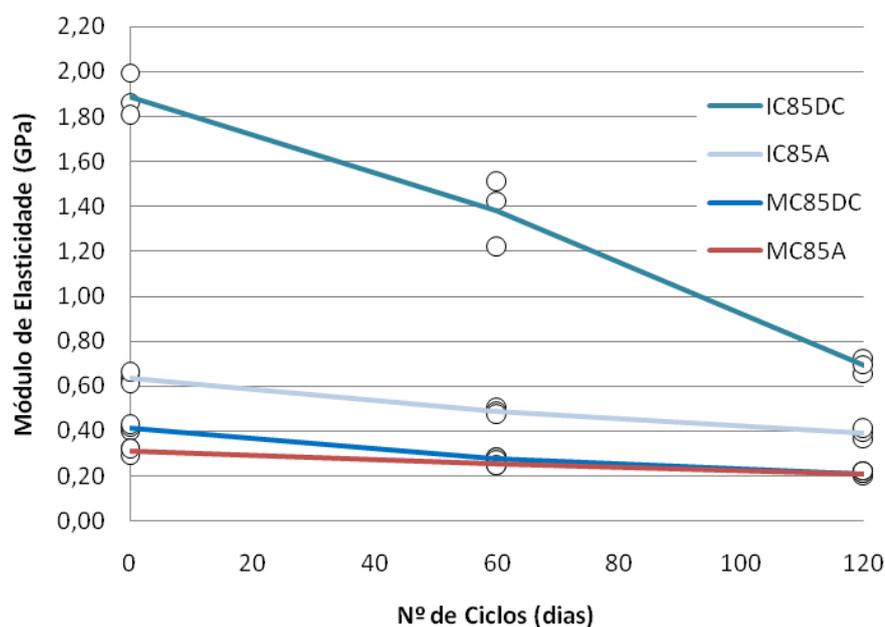
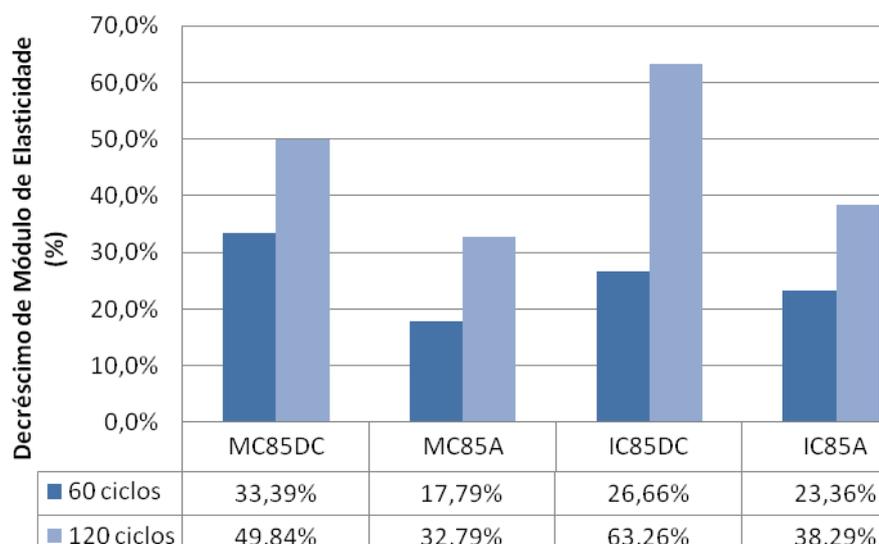


Figura 6.12 – Evolução do módulo de elasticidade à tracção por flexão ao longo dos ciclos.

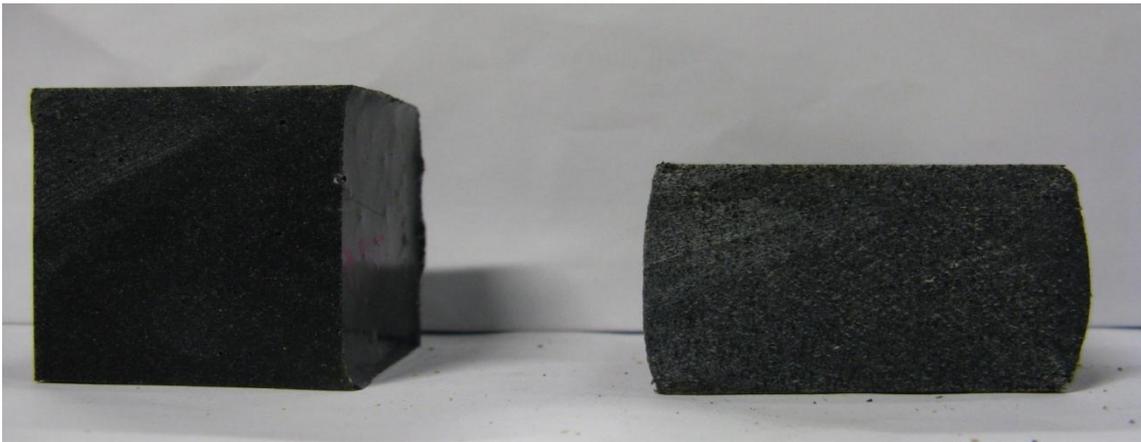


*Figura 6.13 – Decréscimo do módulo de elasticidade à tracção por flexão (%) aos 60 e 120 ciclos.*

Em relação aos valores do módulo de elasticidade em tracção por flexão, analisando a Figura 6.12, verifica-se uma diminuição constante do módulo de elasticidade com o aumento do número de ciclos. Pela Figura 6.13, constata-se que o maior decréscimo ocorreu para os provetes de resina ICOSIT KC 220/60 em cerca de 63% para os provetes de borracha e cerca de 38% para os provetes de cortiça. No entanto, o módulo de elasticidade dos provetes IC85DC é sempre superior a todos os outros. Os provetes de resina MC sofreram um decréscimo no seu valor de módulo de elasticidade em cerca de 50% para os provetes de borracha e em cerca de 33% para os provetes de cortiça, ao fim dos 120 ciclos. Desta forma, conclui-se que os provetes com borracha, para além de serem os mais afectados em termos de resistência à flexão, são igualmente os mais afectados pelos ciclos de molhagem-secagem em ambiente salino, em termos de valores de módulo de elasticidade.

### **6.1.3 ENSAIO À COMPRESSÃO MONOTÓNICA**

Apresentam-se nas Figuras 6.14 e 6.15 os modos de rotura típicos à compressão para 35% de extensão dos provetes ensaiados. Os modos de rotura mantiveram-se semelhantes nos 0, 60 e 120 ciclos.

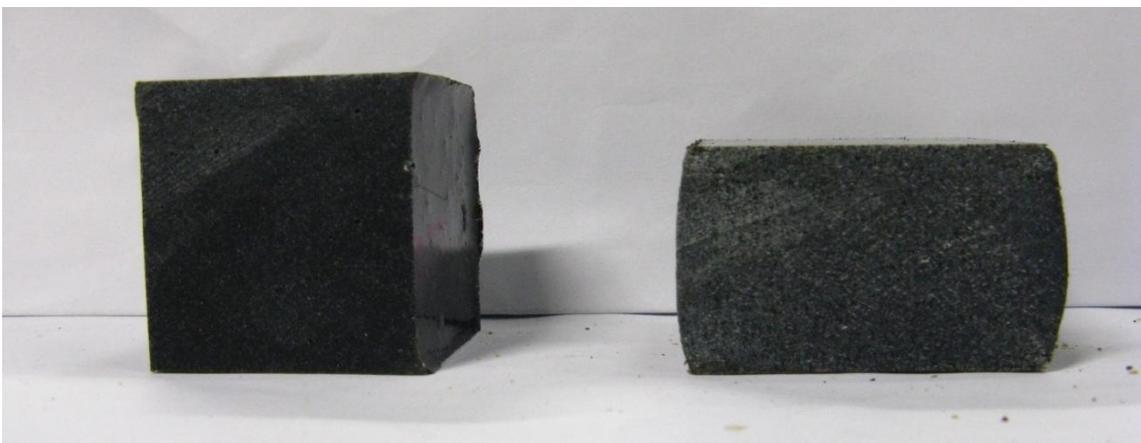


a)



(b)

*Figura 6.14 – Pormenores dos modos de rotura à compressão monotónica para 35% de extensão dos provetes: a) s MC85DC e b) MC85A.*



a)



b)

*Figura 6.15 – Pormenores dos modos de rotura à compressão monotónica para 35% de extensão dos provetes: a) IC85DC e b) IC85A.*

As Figuras 6.16 a 6.19 apresentam os diagramas tensão – deformação dos ensaios de compressão monotónica, que serviram de base para a construção das Tabelas 6.5 a 6.8 nas quais se apresentam os valores obtidos em cada provete para a tensão de cedência ( $f_c$ ), extensão de cedência ( $\epsilon_{pct}$ ), tensão de rotura à compressão para 35% de extensão ( $f_{r,35\%}$ ) e do módulo de elasticidade (E), respectivamente, e correspondentes valores médios dos provetes de controlo, que não sofreram degradação, bem como dos provetes com 60 e 120 ciclos de envelhecimento artificial.

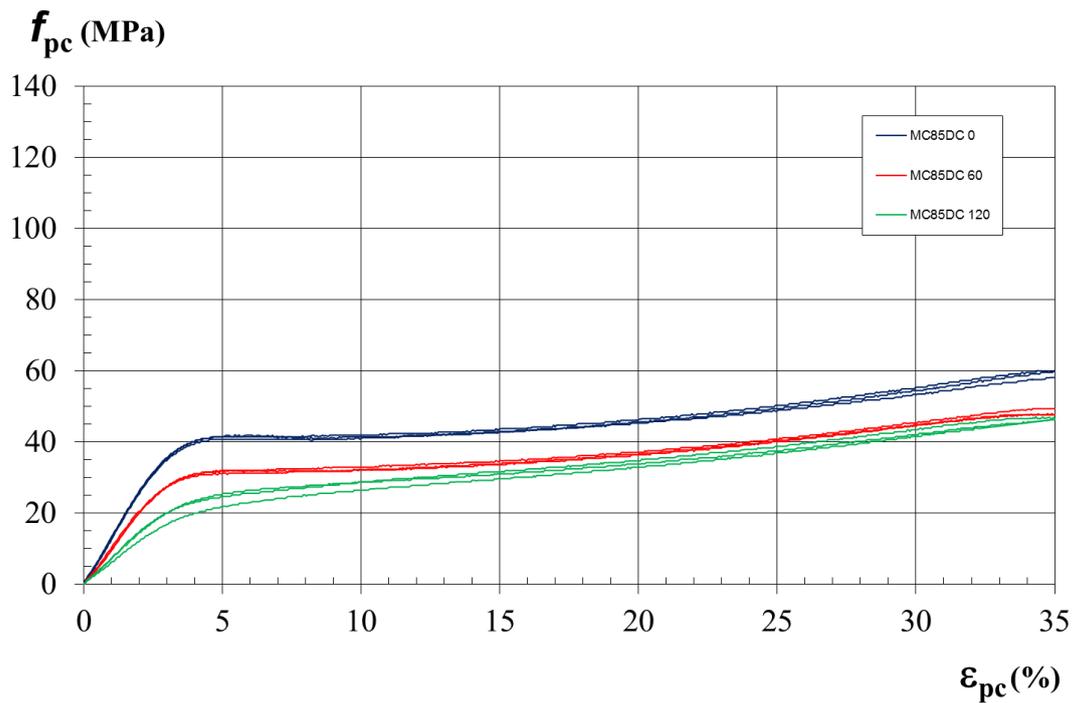


Figura 6.16 – Diagrama tensão deformação do ensaio à compressão monotónica aos 0, 60 e 120 ciclos dos provetes MC85DC.

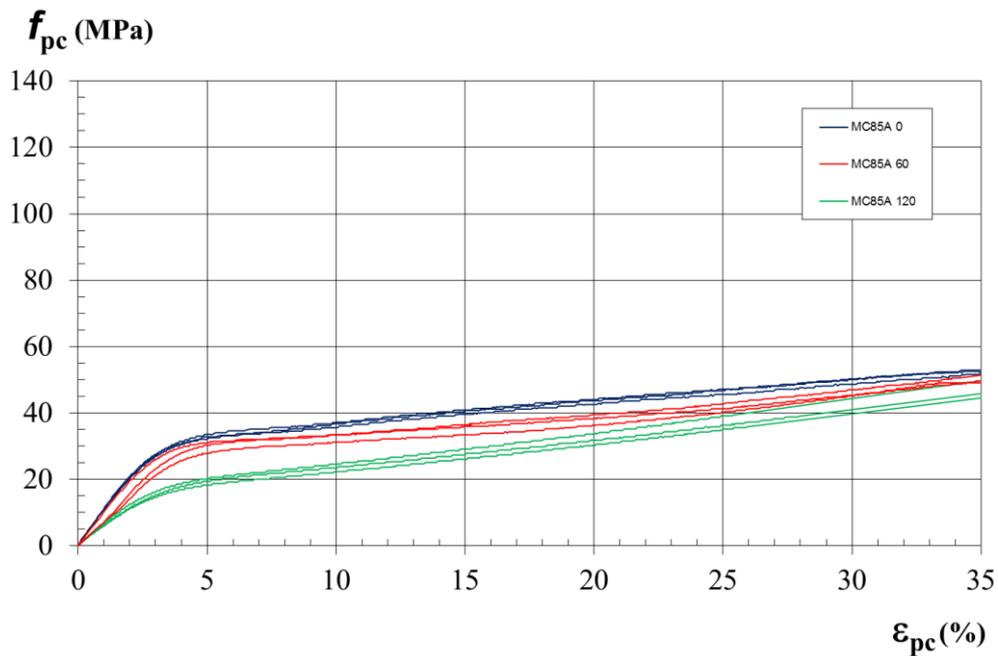


Figura 6.17 – Diagrama tensão deformação do ensaio à compressão monotónica aos 0, 60 e 120 ciclos dos provetes MC85A.

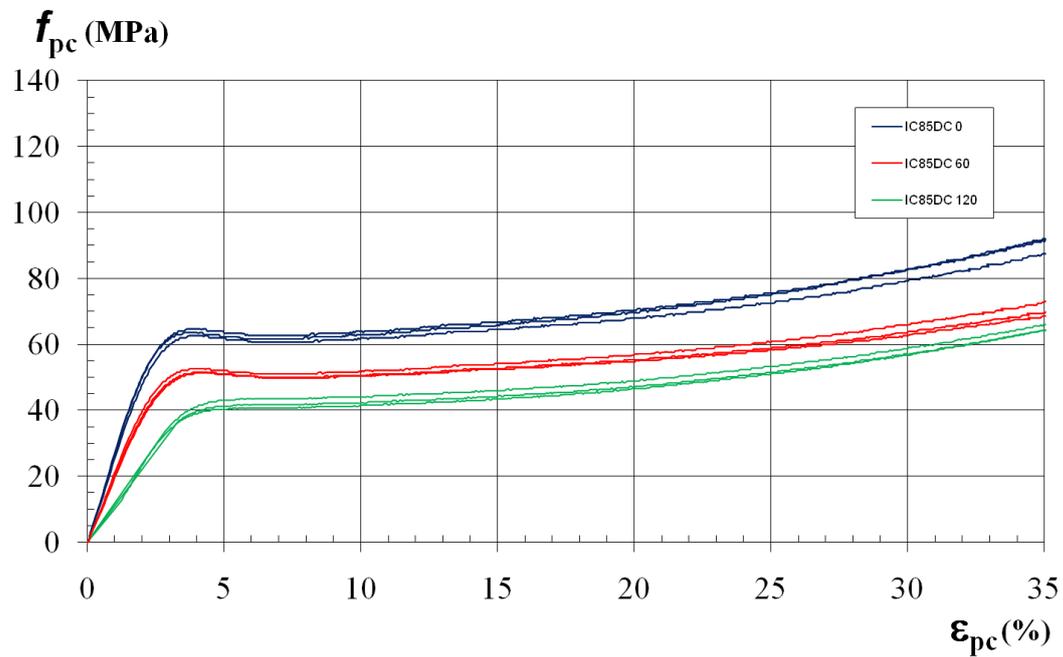


Figura 6.18 – Diagrama tensão deformação do ensaio à compressão monotônica aos 0, 60 e 120 ciclos dos provetes IC85DC.

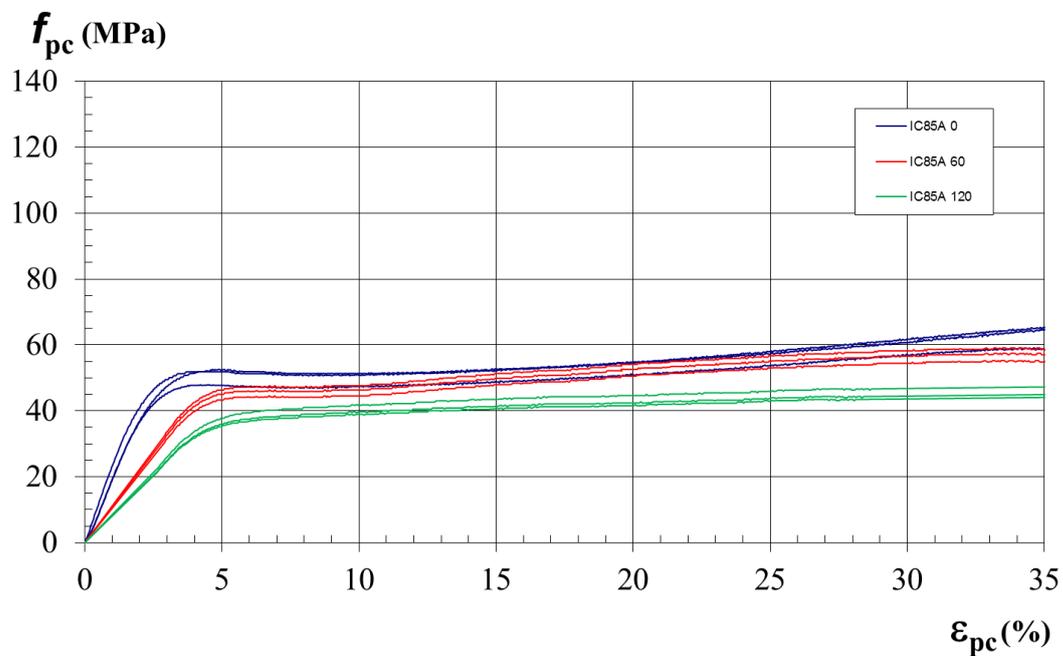


Figura 6.19 – Diagrama tensão deformação do ensaio à compressão monotônica aos 0, 60 e 120 ciclos dos provetes IC85A.

Tabela 6.5 – Tensão de cedência aos 0, 60 e 120 ciclos dos provetes MC85DC, MC85A, IC85DC e IC85A.

	proвете	0 ciclos		60 ciclos		120 ciclos	
		$f_{pct,i}$ (MPa)	$f_{pct,m}$ (MPa)	$f_{pct,i}$ (MPa)	$f_{pct,m}$ (MPa)	$f_{pct,i}$ (MPa)	$f_{pct,m}$ (MPa)
Tensão de Cedência	MC85DC-1	40,2	40,7	31,0	30,8	19,6	21,9
	MC85DC-2	41,0		30,3		22,4	
	MC85DC-3	41,0		31,1		23,6	
	MC85A-1	31,4	31,0	27,1	27,9	16,3	16,9
	MC85A-2	31,1		27,6		18,0	
	MC85A-3	30,4		29,1		16,4	
	IC85DC-1	61,4	62,8	50,9	51,4	39,8	41,0
	IC85DC-2	64,1		51,1		42,6	
	IC85DC-3	63,0		52,1		40,8	
	IC85A-1	51,8	50,3	43,7	45,3	40,2	38,2
	IC85A-2	47,5		46,7		37,8	
	IC85A-3	51,7		45,6		36,7	

Tabela 6.6 – Tensão a 35% de extensão 0, 60 e 120 ciclos dos provetes MC85DC, MC85A, IC85DC e IC85A.

	proвете	0 ciclos		60 ciclos		120 ciclos	
		$f_{r,i,35\%}$ (MPa)	$f_{r,m,35\%}$ (MPa)	$f_{r,i,35\%}$ (MPa)	$f_{r,m,35\%}$ (MPa)	$f_{r,i,35\%}$ (MPa)	$f_{r,m,35\%}$ (MPa)
Tensão a 35% de Extensão	MC85DC-1	58,1	59,4	47,7	48,2	46,4	46,4
	MC85DC-2	60,1		47,6		46,6	
	MC85DC-3	60,1		49,4		46,3	
	MC85A-1	48,3	50,8	49,1	50,1	44,5	46,7
	MC85A-2	52,6		49,7		49,7	
	MC85A-3	51,6		51,4		45,9	
	IC85DC-1	87,5	90,5	68,7	70,4	64,2	64,8
	IC85DC-2	91,9		69,6		66,0	
	IC85DC-3	92,1		73,0		64,2	
	IC85A-1	61,2	61,4	55,0	56,9	47,3	45,4
	IC85A-2	58,5		58,6		44,9	
	IC85A-3	64,5		57,0		44,1	

Tabela 6.7 – Extensão de cedência aos 0, 60 e 120 ciclos dos provetes MC85DC, MC85A, IC85DC e IC85A.

	proвете	0 ciclos		60 ciclos		120 ciclos	
		$\varepsilon_{pct,i}$ (%)	$\varepsilon_{pct,m}$ (%)	$\varepsilon_{pct,i}$ (%)	$\varepsilon_{pct,m}$ (%)	$\varepsilon_{pct,i}$ (%)	$\varepsilon_{pct,m}$ (%)
Extensão de Cedência	MC85DC-1	4,3	4,3	4,1	4,1	3,9	3,8
	MC85DC-2	4,2		4,1		3,6	
	MC85DC-3	4,5		4,1		4,0	
	MC85A-1	4,1	4,0	3,8	3,8	3,6	3,6
	MC85A-2	4,0		3,9		3,7	
	MC85A-3	3,9		3,8		3,4	
	IC85DC-1	3,3	3,4	3,7	3,7	4,4	4,4
	IC85DC-2	3,6		3,7		4,4	
	IC85DC-3	3,4		3,6		4,5	
	IC85A-1	4,1	4,0	5,2	5,3	6,9	6,3
	IC85A-2	3,8		5,3		6,3	
	IC85A-3	4,1		5,3		5,8	

Tabela 6.8 – Módulo de elasticidade aos 0, 60 e 120 ciclos dos provetes MC85DC, MC85A, IC85DC e IC85A.

	proвете	0 ciclos		60 ciclos		120 ciclos	
		$E_i$ (GPa)	$E_m$ (GPa)	$E_i$ (GPa)	$E_m$ (GPa)	$E_i$ (GPa)	$E_m$ (GPa)
Módulo de Elasticidade	MC85DC-1	1,3	1,3	1,0	1,1	0,6	0,7
	MC85DC-2	1,3		1,1		0,6	
	MC85DC-3	1,3		1,1		0,9	
	MC85A-1	0,8	0,9	0,7	0,8	0,5	0,6
	MC85A-2	1,0		0,8		0,6	
	MC85A-3	0,8		0,8		0,5	
	IC85DC-1	1,9	2,0	1,5	1,5	0,8	0,9
	IC85DC-2	2,0		1,5		1,0	
	IC85DC-3	2,1		1,6		0,8	
	IC85A-1	1,9	1,7	0,9	0,9	0,8	0,8
	IC85A-2	1,6		0,9		0,8	
	IC85A-3	1,7		0,9		0,8	

Com base nos dados fornecidos pela Tabela 6.5, elaborou-se o gráfico da Figura 6.20 que representa a evolução dos valores de tensão de cedência ao longo dos ciclos. A Figura 6.21 apresenta os valores de perda de resistência à compressão, em % aos 60 e aos 120 ciclos, com base nos valores medidos da tensão de cedência.

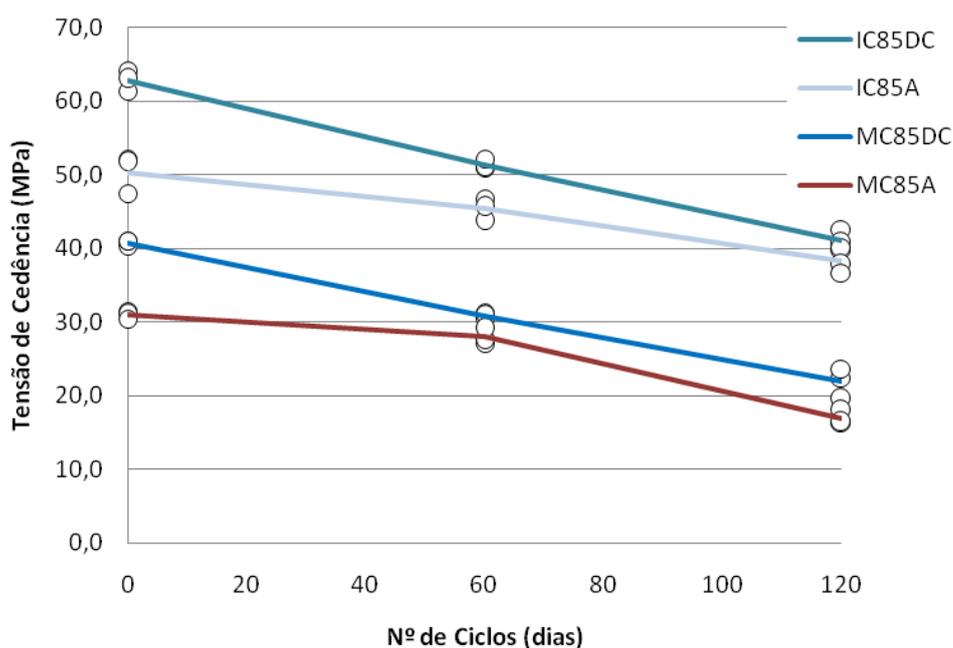


Figura 6.20 – Evolução da tensão de cedência ao longo dos ciclos.

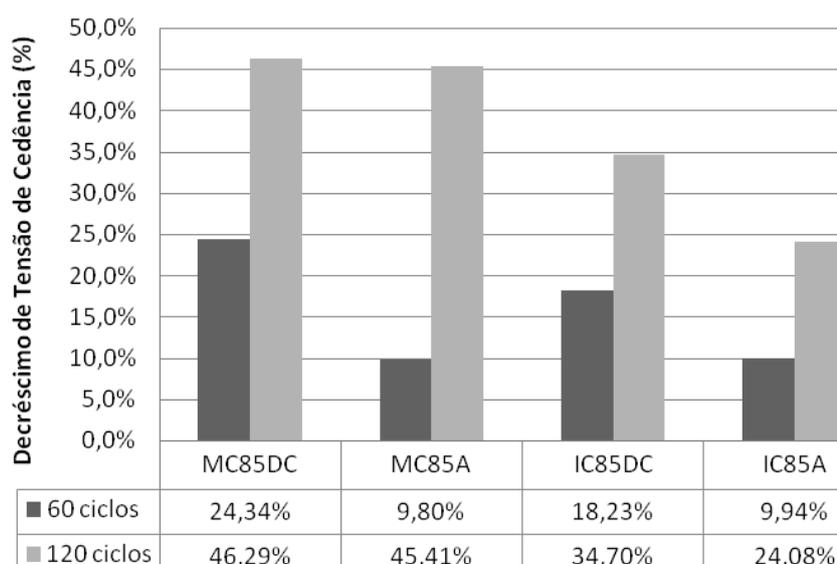


Figura 6.21 – Decréscimo da tensão de cedência (%) aos 60 e aos 120 ciclos

Da análise das Figuras 6.20 e 6.21 constata-se que a resistência à compressão foi severamente afectada para todos os provetes, visto que, ao fim dos 120 ciclos de molhagem-secagem em ambiente salino, a perda de resistência à compressão foi sempre superior à perda de resistência à tracção.

Tal como ocorreu no ensaio à tracção por flexão, a maior perda de resistência à compressão ocorreu para os provetes MC85DC, atingindo cerca de 46% aos 120 ciclos, seguido dos provetes MC85A com cerca de 45% de perda. Apesar desta semelhança de valores aos 120 ciclos, o mesmo não ocorreu com os provetes ensaiados aos 60 ciclos, havendo cerca de 24% de perda em resistência para os provetes MC85DC e cerca de 10% para os provetes MC85A. Verificou-se assim, que tanto os provetes com borracha como os com cortiça, de resina MC sofreram a maior perda de resistência à compressão dos 60 aos 120 ciclos.

Os provetes com resina IC sofreram menos perda de resistência à compressão que os provetes análogos com resina MC, tal como já tinha sucedido no ensaio à flexão. Comparando os provetes com esta resina entre si, observa-se que, mais uma vez, os provetes com borracha sofreram um decréscimo em resistência à compressão superior aos provetes de cortiça. No entanto, esta diferença de valores é de apenas 10%, não sendo desta forma tão acentuada quanto a observada no ensaio à flexão. Tal como se observou nos provetes de resina MC, a maior perda de resistência ocorreu dos 60 aos 120 ciclos.

A partir dos dados fornecidos pela Tabela 6.6, construiu-se o gráfico presente na Figura 6.22 que apresenta o decréscimo, em percentagem, dos valores das tensões de rotura a 35% de extensão aos 60 e aos 120 ciclos.

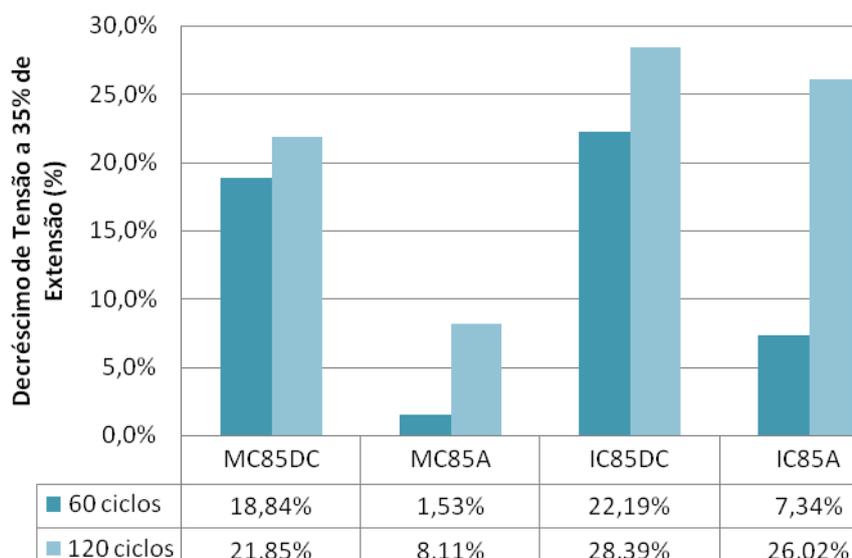


Figura 6.22 – Decréscimo de tensão a 35% de extensão (%) aos 60 e aos 120 ciclos.

Em relação à tensão de rotura a 35% de extensão, verifica-se na Figura 6.22 que, mais uma vez, os provetes com borracha sofreram uma maior diminuição do seu valor: em cerca de 22% nos provetes de resina MC e em cerca de 28% nos provetes de resina IC. Desta forma, apesar de haver um menor decréscimo nos valores de tensão de cedência para os provetes com resina ICOSIT, tal não aconteceu quando comparamos os valores da tensão de rotura a 35% da extensão.

Além disso, verifica-se que, apesar de os provetes MC85A terem um grande decréscimo no valor da tensão de cedência aos 120 ciclos, tal não ocorre nos valores da tensão de rotura a 35% de extensão. Observando a Figura 6.17, verifica-se que as tensões na fase elástica dos provetes ensaiados aos 120 ciclos vão quase igualar os valores de tensões observadas aos 0 e aos 60 ciclos. Um fenómeno semelhante ocorre nos provetes MC85DC nos quais se verifica que as tensões, em fase elástica, aos 120 ciclos, vão quase igualar os valores medidos aos 60 ciclos, não se verificando a mesma relação dos 0 aos 60 ciclos, em que existe um decréscimo no valor da tensão a 35% de extensão de cerca de 19%.

A partir dos dados fornecidos pela Tabela 6.7, apresenta-se na Figura 6.23 a evolução dos valores da extensão de cedência dos vários provetes ao longo dos ciclos.

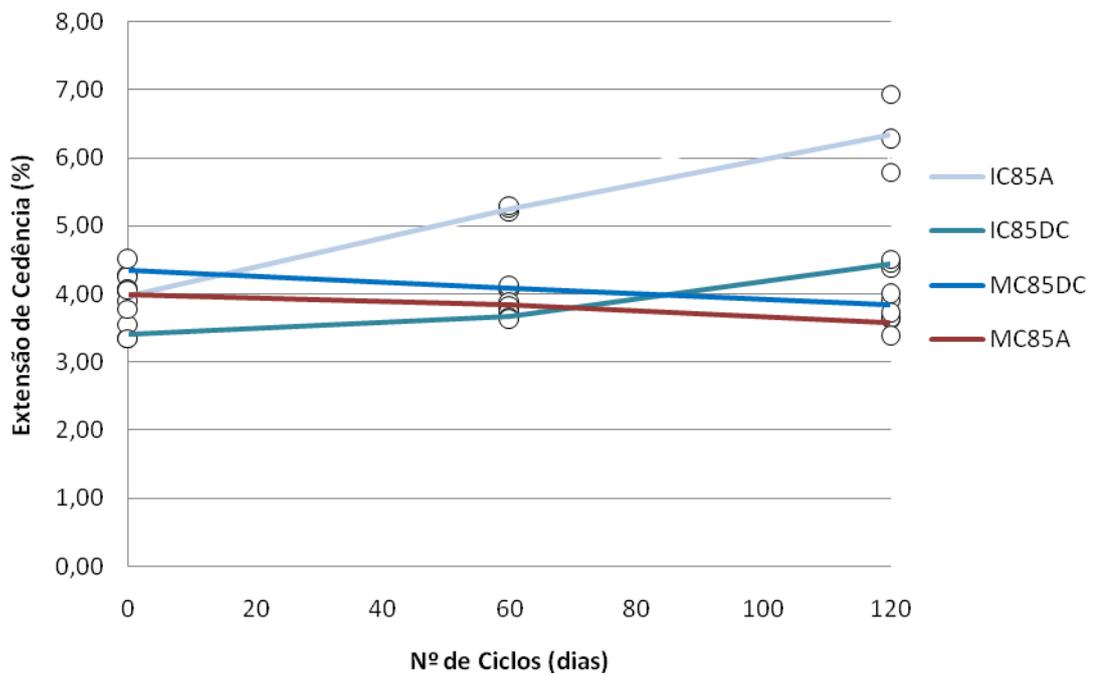
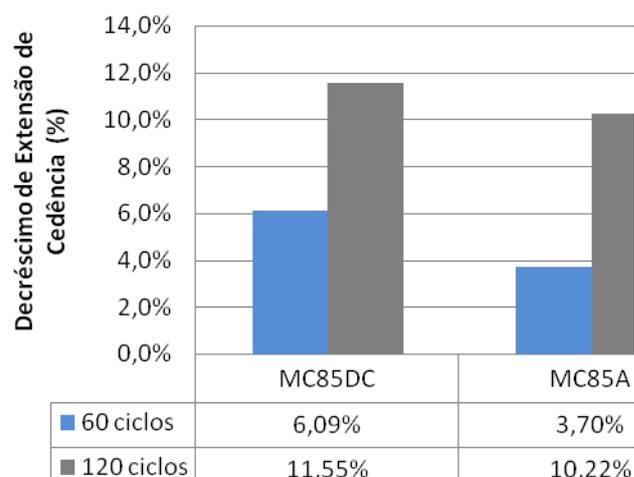


Figura 6.23 – Evolução da extensão de cedência ao longo dos ciclos.

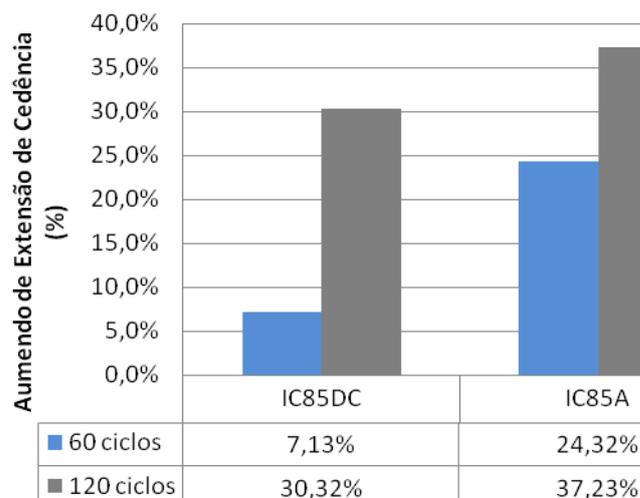
Relativamente à extensão de cedência, a Tabela 6.7 e a Figura 6.23 permitem constatar um decréscimo do seu valor para os provetes com resina MC (MC85DC e MC85A). A Figura 6.24 apresenta o decréscimo, em percentagem, do valor de extensão de cedência aos 60 e aos 120 ciclos.



*Figura 6.24 – Decréscimo de extensão de cedência (%) dos provetes MC85DC e MC85A aos 60 e aos 120 ciclos.*

Constata-se pela Figura 6.24 que, o maior decréscimo no valor de extensão de cedência ocorreu nos provetes MC85DC atingindo cerca de 12% aos 120 ciclos enquanto que os provetes MC85A sofreram um decréscimo de cerca de 10%. Ao contrário do que ocorre nos provetes de borracha, em que o decréscimo dos 0 aos 60 ciclos é praticamente igual ao decréscimo observado dos 60 aos 120 ciclos, nos provetes de cortiça verifica-se que a maior diminuição do valor de extensão de cedência é verificado dos 60 aos 120 ciclos.

De igual forma, a Figura 6.23 permite constatar que, ao contrário do sucedido nos provetes com resina MC, os provetes com resina IC sofreram um aumento de valor de extensão de cedência. A Figura 6.25 apresenta o aumento, em percentagem do valor de extensão de cedência dos provetes com este tipo de resina (IC85DC e IC85A), aos 60 e aos 120 ciclos.



*Figura 6.25 – Aumento de extensão de cedência (%) dos provetes IC85DC e IC85A aos 60 e aos 120 ciclos.*

O maior aumento do valor da extensão de cedência ocorreu para os provetes IC85A, em cerca de 37% aos 120 ciclos, enquanto que os provetes IC85DC apenas sofreram um acréscimo de cerca de 30%. O maior acréscimo de valor de extensão de cedência nos provetes de borracha ocorreu dos 60 aos 120 ciclos, enquanto que nos provetes de cortiça, o maior aumento ocorreu nos 60 primeiros ciclos.

Através dos dados fornecidos pela Tabela 6.8 retratou-se na Figura 6.26 a evolução do módulo de elasticidade à compressão dos provetes ao longo dos ciclos e na Figura 6.27 o decréscimo do mesmo, em percentagem aos 60 e aos 120 ciclos.

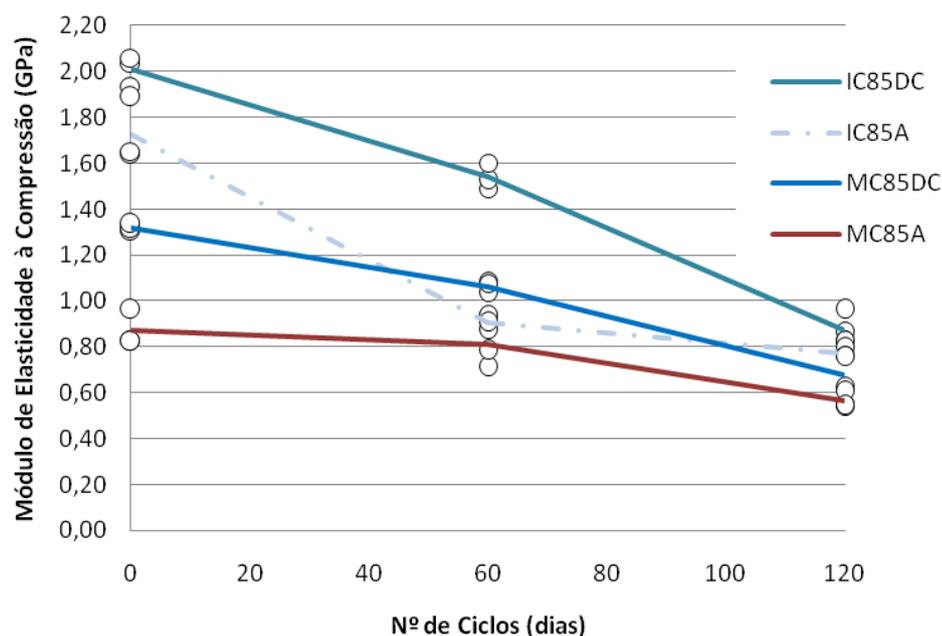


Figura 6.26 – Evolução do módulo de elasticidade à compressão ao longo dos ciclos.

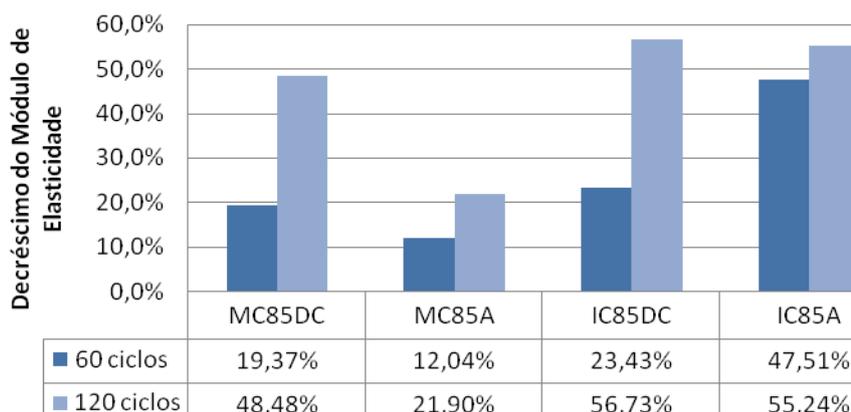


Figura 6.27 – Decréscimo do módulo de elasticidade à compressão (%) aos 60 e 120 ciclos.

Tal como ocorreu no ensaio à tracção por flexão, o módulo de elasticidade de todos os provetes sofreu um decréscimo do seu valor ao longo dos ciclos. Mais uma vez, o maior decréscimo ocorreu nos provetes com resina IC, em cerca de 57% nos provetes com borracha e 55% nos provetes de cortiça.

Verifica-se que o maior decréscimo no valor do módulo de elasticidade dos provetes de borracha ocorre dos 60 aos 120 ciclos enquanto que, nos provetes de cortiça, se verifica uma maior diminuição dos 0 aos 60 ciclos. No entanto, o módulo de elasticidade dos

provetes com resina ICé sempre superior ao módulo de elasticidade dos provetes análogos com resina MC.

Comparando os dois tipos de agregado, verifica-se que para ambos os tipos de resina, a borracha DC8000 foi o agregado que sofreu uma maior diminuição no valor do módulo de elasticidade.

## **6.2 ENVELHECIMENTO ARTIFICIAL DEVIDO A CICLOS DE MOLHAGEM-SECAGEM EM AMBIENTES ÁCIDOS**

Nos ciclos de molhagem-secagem em ambientes ácidos seguiu-se o procedimento experimental descrito no capítulo 5.

### **6.2.1 ÁCIDO SULFÚRICO**

#### **6.2.1.1 AVALIAÇÃO DA PERDA DE MASSA**

Apresenta-se na seguinte Tabela 6.9 a evolução da massa dos provetes ao longo dos ciclos estudados e na Tabela 6.10 a perda de massa, em percentagem, dos provetes imersos nas diferentes concentrações de ácido sulfúrico ao longo dos 5 ciclos de imersão-secagem.

Tabela 6.9 – Evolução da massa (g) ao longo dos ciclos de imersão-secagem nas várias concentrações de ácido sulfúrico.

Concentração de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%)	Provete	Massa (g)											
		0 ciclos		1º ciclo		2º ciclo		3º ciclo		4º ciclo		5º ciclo	
5%	1	18,090		18,090		18,080		18,070		18,060		18,060	
	2	21,210	19,333	21,210	19,333	21,210	19,323	21,200	19,317	21,180	19,303	21,170	19,299
	3	18,700		18,700		18,680		18,680		18,670		18,666	
10%	1	17,840		17,840		17,830		17,830		17,820		17,810	
	2	19,770	19,153	19,770	19,153	19,760	19,140	19,760	19,133	19,750	19,123	19,740	19,113
	3	19,850		19,850		19,830		19,810		19,800		19,790	
15%	1	17,570		17,570		17,550		17,540		17,520		17,500	
	2	18,700	18,283	18,700	18,283	18,690	18,267	18,690	18,260	18,680	18,243	18,670	18,227
	3	18,580		18,580		18,560		18,550		18,530		18,510	
20%	1	17,960		17,960		17,950		17,950		17,930		17,920	
	2	18,640	18,383	18,640	18,383	18,600	18,363	18,590	18,357	18,580	18,340	18,550	18,320
	3	18,550		18,550		18,540		18,530		18,510		18,490	
30%	1	17,980		17,980		17,950		17,950		17,920		17,880	
	2	18,870	18,513	18,850	18,503	18,840	18,487	18,830	18,483	18,820	18,467	18,790	18,433
	3	18,690		18,680		18,670		18,670		18,660		18,630	

Tabela 6.10 – Perda de massa (%) ao longo dos ciclos de imersão-secagem nas várias concentrações de ácido sulfúrico.

Concentração de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (%)	Provete	Massa Perdida (%)				
		1º ciclo	2º ciclo	3º ciclo	4º ciclo	5º ciclo
5%	1					
	2	0,000%	0,052%	0,086%	0,155%	0,179%
	3					
10%	1					
	2	0,000%	0,070%	0,104%	0,157%	0,209%
	3					
15%	1					
	2	0,000%	0,091%	0,128%	0,219%	0,310%
	3					
20%	1					
	2	0,000%	0,109%	0,145%	0,236%	0,345%
	3					
30%	1					
	2	0,054%	0,144%	0,162%	0,252%	0,432%
	3					

Através dos dados presentes na Tabela 6.9, construiu-se o gráfico da Figura 6.28 que mostra a evolução da massa dos provetes imersos nas diferentes concentrações de ácido sulfúrico em função dos ciclos. Mostra-se na Figura 6.29 a perda de massa dos provetes, em percentagem dos provetes MC85DC ao longo dos vários ciclos de exposição.

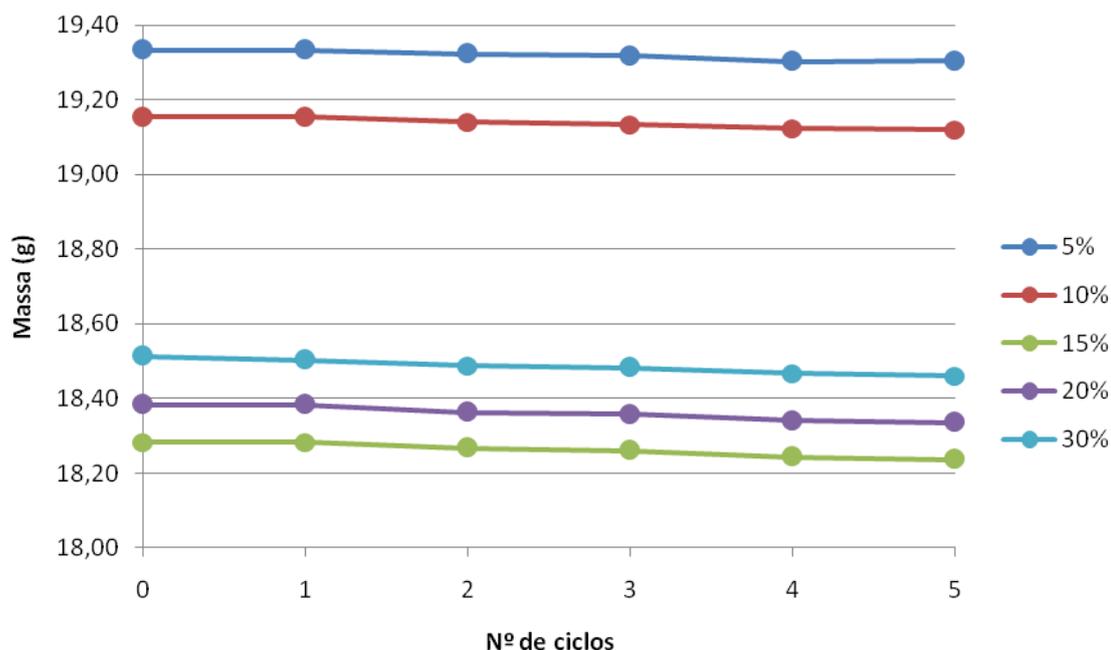


Figura 6.28 – Evolução da massa média ao longo dos ciclos nas várias concentrações de ácido sulfúrico.

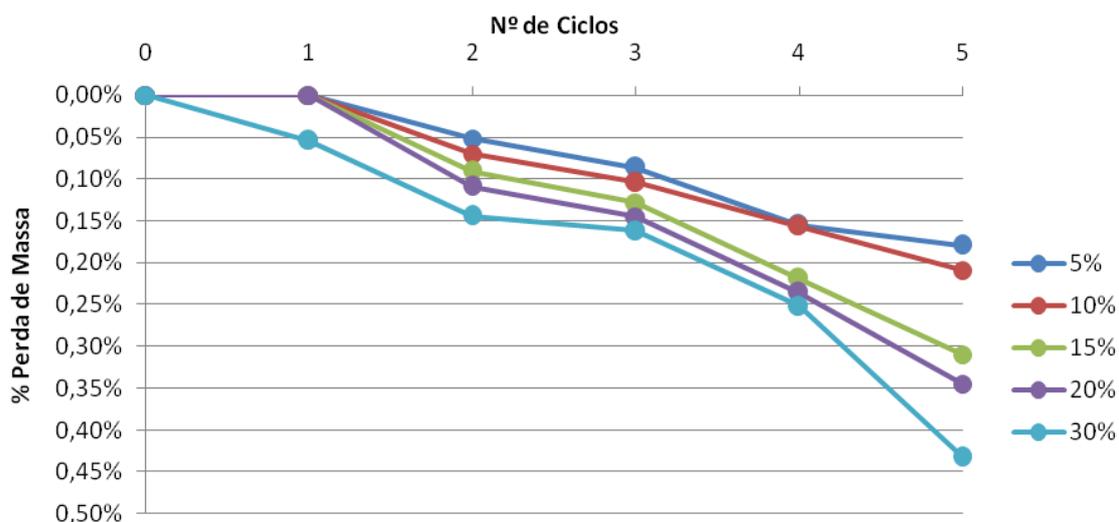


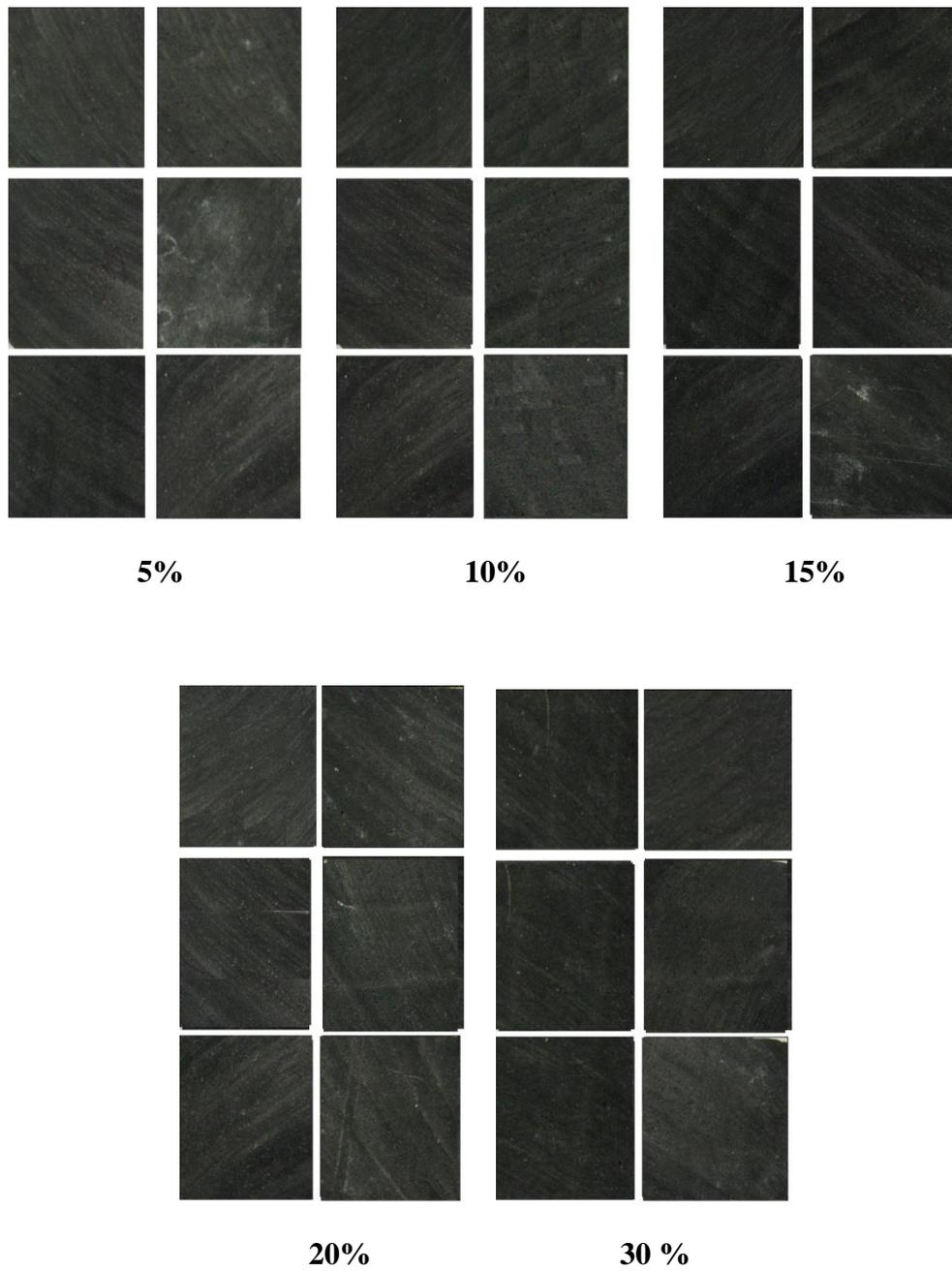
Figura 6.29 – Evolução da perda de massa (%) ao longo dos ciclos.

Constata-se da análise da Figura 6.28 que os provetes MC85DC imersos nas várias concentrações de ácido sulfúrico mantiveram a sua massa praticamente inalterada, no final dos ciclos. Observando a Tabela 6.10 e a Figura 6.29 observa-se que os provetes apresentam um valor máximo de massa perdida de 0,45% para a concentração de 30% em ácido sulfúrico. Os resultados mostram que quanto maior foi a concentração de ácido sulfúrico, maior foi a perda de massa sendo que para o 1º ciclo apenas se observou perda de massa para a concentração de 30%. Avaliando a evolução da massa dos provetes ao longo dos ciclos, observa-se que a partir do 3º ciclo a perda de massa de todos os provetes é relativamente a mesma, qualquer que seja a concentração de ácido utilizada.

Os valores de perda de massa dos provetes, para qualquer valor de concentração em ácido mostraram-se muito baixos, inferiores a 0,5%, pelo que se conclui que o material em estudo tem uma alta resistência, em termos de perda de massa, aos ciclos de molhagem-secagem em ácido sulfúrico.

#### **6.2.1.2 ALTERAÇÕES NA COR E TEXTURA**

A Figura 6.30 mostra fotos comparativas dos provetes MC85DC aos 0 e aos 5 ciclos de imersão-secagem nas várias soluções de ácido sulfúrico. Esta Figura mostra que a imersão em ácido sulfúrico provocou uma pequena descoloração nos provetes, não se observando nenhuma correlação entre o aumento da concentração em ácido sulfúrico e a descoloração observada, pois a maior descoloração ocorreu nos provetes imersos na solução de 5% de ácido, tendo inclusive aparecido manchas brancas.



*Figura 6.30 – Foto comparativa dos provetes aos 0 e aos 5 ciclos de imersão em ácido sulfúrico (Escala 1:2).*

## 6.2.2 ÁCIDO FÓRMICO

### 6.2.2.1 AVALIAÇÃO DA PERDA DE MASSA

Apresenta-se na seguinte Tabela 6.11 a evolução da massa ao longo dos ciclos estudados e na Tabela 6.12 a consequente perda de massa, em gramas e em percentagem, dos provetes em ácido fórmico ao longo dos 5 ciclos de imersão-secagem na solução de 10% de ácido fórmico.

*Tabela 6.11 – Evolução da massa (g) ao longo dos ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico.*

Provete	Massa (g)											
	0 ciclos		1º ciclo		2º ciclo		3º ciclo		4º ciclo		5º ciclo	
MC85DC-1	76,66		74,39		74,13		73,91		73,76		73,45	
MC85DC-2	76,36	76,34	76,10	75,40	75,85	75,15	75,64	74,93	75,45	74,76	75,16	74,46
MC85DC-3	75,99		75,72		75,47		75,23		75,06		74,77	
MC85A-1	65,22		64,80		64,41		64,03		63,74		63,39	
MC85A-2	65,57	66,34	65,14	65,94	64,74	65,56	64,36	65,13	64,06	64,85	63,78	64,53
MC85A-3	68,24		67,88		67,53		67,01		66,75		66,43	
IC95DC-1	71,520		70,690		70,200		69,610		69,120		68,910	
ICP5DC-2	68,750	70,87	67,960	70,07	67,490	69,59	66,800	68,93	66,320	68,44	66,121	68,13
IC95DC-3	72,350		71,550		71,070		70,390		69,890		69,369	
IC95A-1	63,100		62,210		61,670		60,920		60,580		60,325	
IC95A-2	65,760	65,88	65,380	65,07	64,540	64,33	64,190	63,88	63,680	63,47	63,560	63,19
IC95A-3	68,780		67,630		66,770		66,520		66,150		65,690	

*Tabela 6.12 – Perda de massa (g e %) ao longo dos ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico.*

Provete	Massa Perdida									
	1º ciclo		2º ciclo		3º ciclo		4º ciclo		5º ciclo	
	g	%	g	%	g	%	g	%	g	%
MC85DC	0,933	1,22%	1,187	1,55%	1,410	1,85%	1,580	2,07%	1,878	2,46%
MC85A	0,402	0,61%	0,78	1,18%	1,21	1,82%	1,49	2,25%	1,81	2,73%
IC95DC	0,807	1,14%	1,29	1,82%	1,94	2,74%	2,43	3,43%	2,74	3,87%
IC95A	0,807	1,22%	1,55	2,36%	2,00	3,04%	2,41	3,66%	2,69	4,08%

Através dos dados fornecidos pela Tabela 6.11 construiu-se o gráfico presente na Figura 6.31 que demonstra a evolução da massa dos provetes ao longo dos ciclos estudados. A Figura 6.32, elaborada a partir da Tabela 6.12, demonstra a perda de massa, em percentagem, ao longo dos ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico.

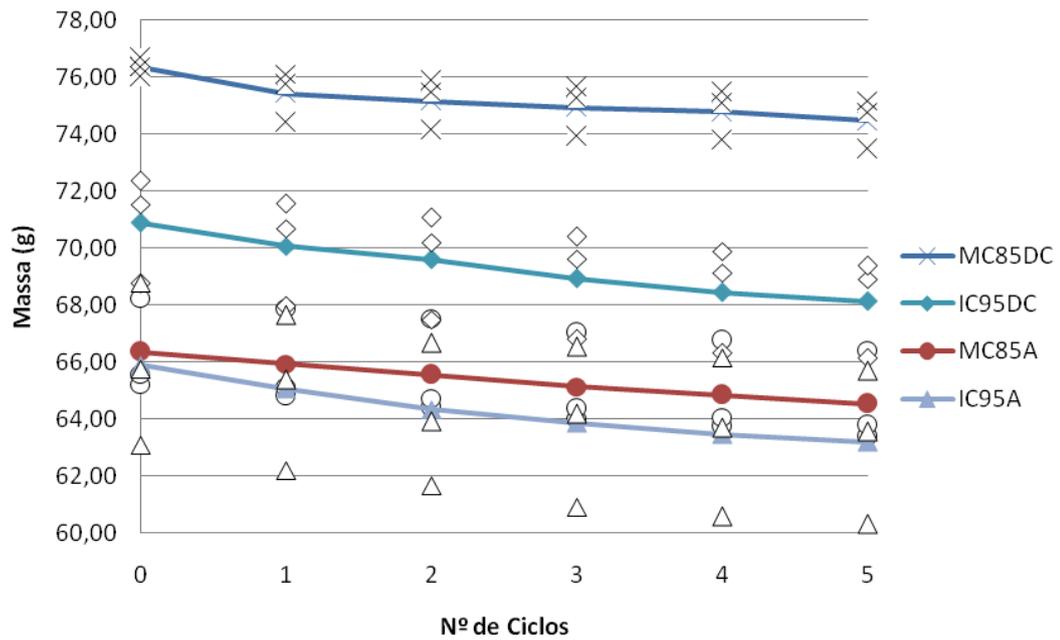


Figura 6.31 – Evolução da massa ao longo dos ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico.

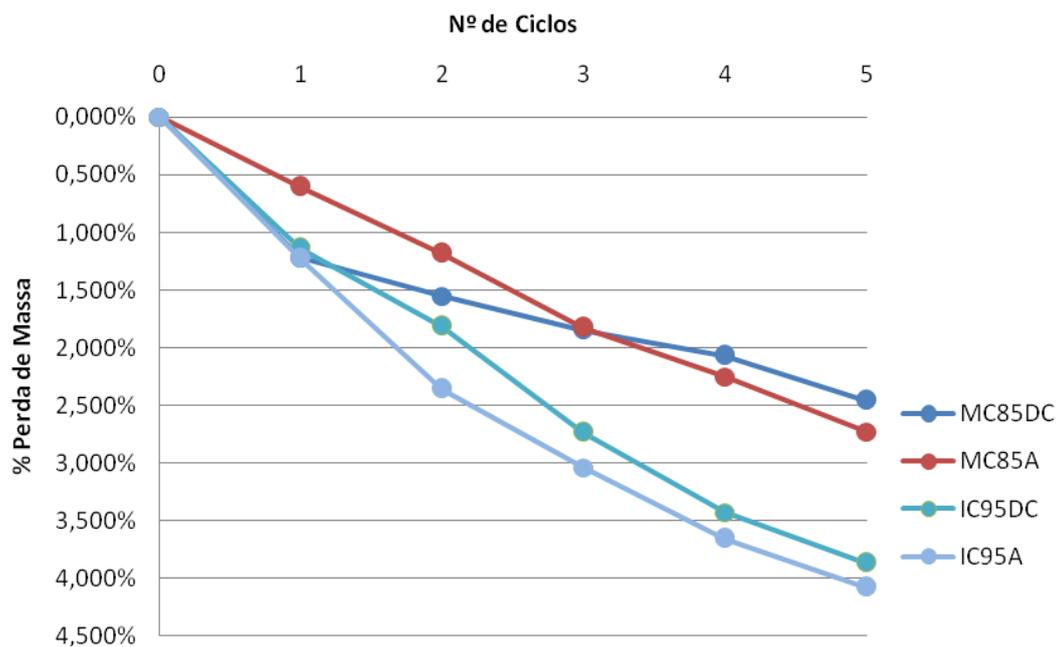


Figura 6.32 – Perda de massa (%) ao longo dos ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico.

Analisando as Tabelas 6.11 e 6.12 e as Figuras 6.31 e 6.32 conclui-se que, ao fim dos 5 ciclos de imersão secagem na solução de 10% de ácido fórmico, todos os provetes

demonstraram perda de massa. Dentro dos provetes de resina MC, os com cortiça foram os que apresentaram maior perda de massa, em cerca de 2,7%. Porém, a Figura demonstra que os provetes de cortiça só começaram a apresentar maior perda de massa que os provetes de borracha a partir do 4º ciclo, permanecendo desta forma até ao 5º ciclo. A diferença de perda de massa, em percentagem, ao 5º ciclo entre os provetes de borracha e de cortiça foi de apenas 0,267%, sendo esta diferença maior nos 2 primeiros ciclos e quase nula ao 3º ciclo. De salientar que os provetes MC85DC demonstraram maior perda de massa quando imersos em ácido fórmico, comparativamente aos provetes imersos nas soluções de ácido sulfúrico.

Dentro dos provetes de resina IC, os provetes de cortiça (IC95A) foram os que apresentaram maior perda de massa, em cerca de 4% ao 5º ciclo, sendo este o maior valor verificado de perda de massa para todos os provetes estudados. Ao contrário do sucedido nos provetes com resina MC, cuja perda de massa nos provetes com borracha não é em todos inferior à dos provetes de cortiça, os provetes com resina IC com cortiça apresentam maior perda de massa que os provetes com borracha em todos os ciclos estudados.

### 6.2.2.2 ENSAIO À COMPRESSÃO MONOTÓNICA

As Figuras 6.33 e 6.34 apresentam os diagramas tensão – deformação dos ensaios de compressão monotónica aos provetes de resina MC-DUR 1390 VK (MC85DC e MC85A), que serviram de base para a construção das Tabelas 6.13 a 6.16 nas quais se apresentam os valores obtidos em cada provete para a tensão de cedência ( $f_c$ ), extensão de cedência ( $\varepsilon_{pct}$ ), tensão a 35% de extensão ( $f_{r,35\%}$ ) e do módulo de elasticidade (E), respectivamente, e correspondentes valores médios dos provetes de controlo, que não sofreram degradação, e dos provetes retirados ao fim de 5 ciclos de imersão-secagem na solução de 10% de ácido fórmico.

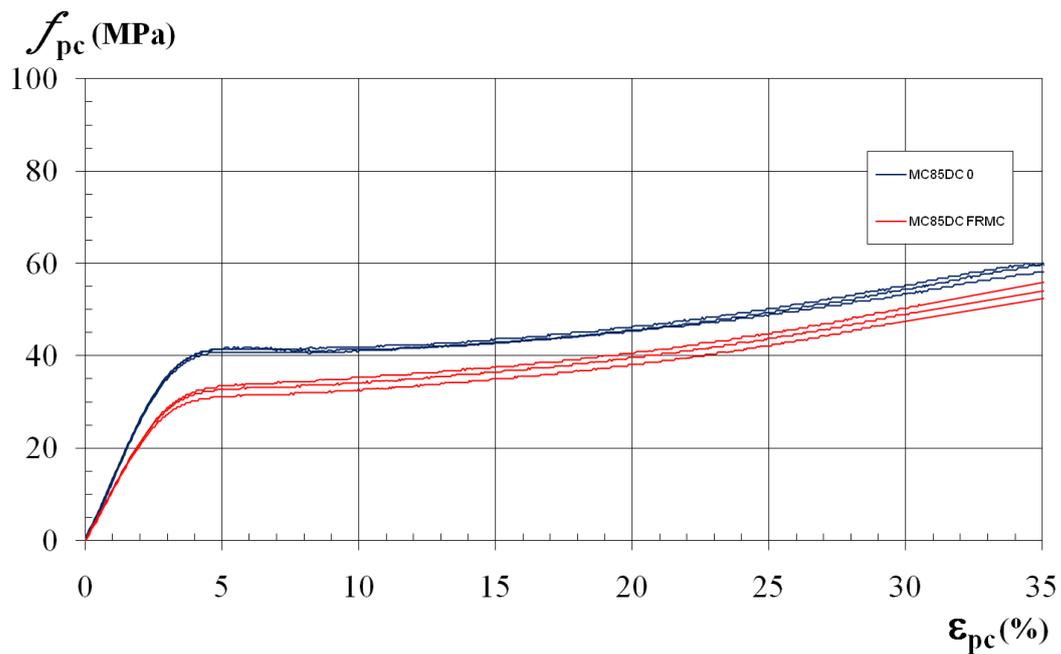


Figura 6.33 – Diagrama tensão deformação do ensaio à compressão monotónica aos 0 e aos 5 ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico dos provetes MC85DC.

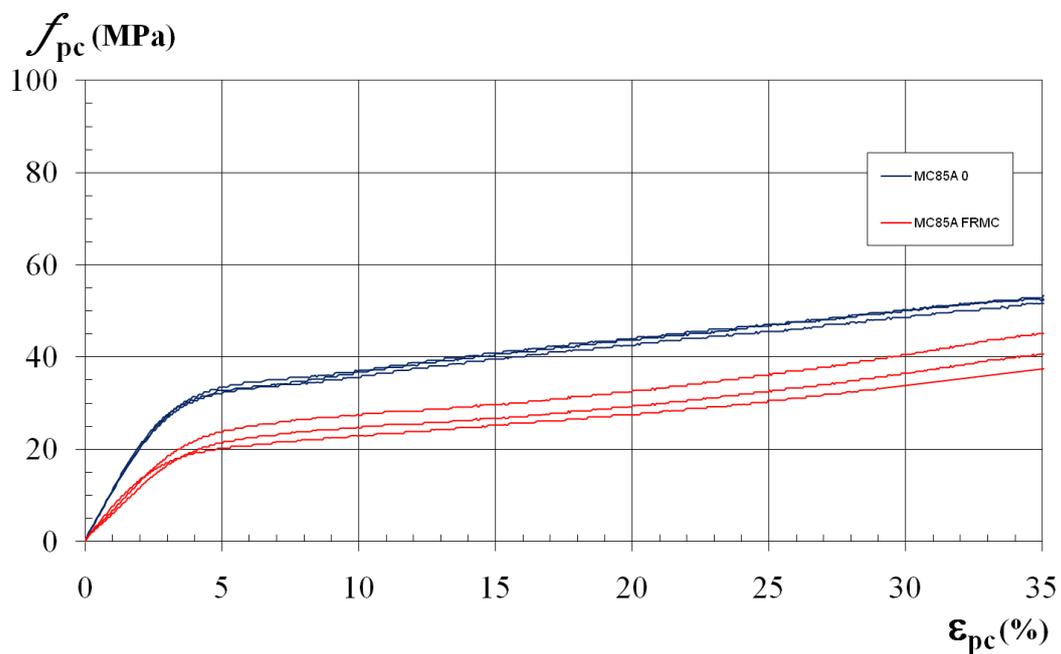


Figura 6.34 – Diagrama tensão deformação do ensaio à compressão monotónica aos 0 e aos 5 ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico dos provetes MC85A.

Tabela 6.13 – Tensão de cedência aos 0 e aos 5 ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico dos provetes MC85DC e MC85A.

	provete	0 ciclos		5 ciclos	
		$f_{pct,i}$ (MPa)	$f_{pct,m}$ (MPa)	$f_{pct,i}$ (MPa)	$f_{pct,m}$ (MPa)
Tensão de Cedência	MC85DC-1	40,2	40,7	32,3	31,3
	MC85DC-2	41,0		31,7	
	MC85DC-3	41,0		29,8	
	MC85A-1	31,4	31,0	21,6	19,3
	MC85A-2	31,1		17,5	
	MC85A-3	30,4		18,8	

Tabela 6.14 – Extensão de cedência aos 0 e aos 5 ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico dos provetes MC85DC e MC85A.

	provete	0 ciclos		5 ciclos	
		$\varepsilon_{pct,i}$ (%)	$\varepsilon_{pct,m}$ (%)	$\varepsilon_{pct,i}$ (%)	$\varepsilon_{pct,m}$ (%)
Extensão de Cedência	MC85DC-1	4,3	4,3	3,6	3,6
	MC85DC-2	4,2		3,8	
	MC85DC-3	4,5		3,5	
	MC85A-1	4,1	4,0	3,9	3,6
	MC85A-2	4,0		3,3	
	MC85A-3	3,9		3,6	

Tabela 6.15 – Tensão a 35% de extensão aos 0 e aos 5 ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico dos provetes MC85DC e MC85A.

	provete	0 ciclos		5 ciclos	
		$f_{r,i,35\%}$ (MPa)	$f_{r,m,35\%}$ (MPa)	$f_{r,i,35\%}$ (MPa)	$f_{r,i,35\%}$ (MPa)
Tensão a 35% de Extensão	MC85DC-1	58,1	59,4	54,0	54,1
	MC85DC-2	60,1		55,9	
	MC85DC-3	60,1		52,3	
	MC85A-1	48,3	50,8	45,1	41,0
	MC85A-2	52,6		37,4	
	MC85A-3	51,6		40,6	

Tabela 6.16 – Módulo de elasticidade aos 0 e aos 5 ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico dos provetes MC85DC e MC85A.

	provete	0 ciclos		5 ciclos	
		$E_i$ (GPa)	$E_m$ (GPa)	$E_i$ (GPa)	$E_m$ (GPa)
Módulo de Elasticidade	MC85DC-1	1,3	1,3	0,8	0,9
	MC85DC-2	1,3		0,9	
	MC85DC-3	1,3		0,8	
	MC85A-1	0,8	0,9	0,6	0,5
	MC85A-2	1,0		0,6	
	MC85A-3	0,8		0,5	

Através dos dados obtidos na Tabela, construiu-se a Tabela 6.17 que apresenta o decréscimo da tensão de cedência, extensão de cedência e módulo de elasticidade, em percentagem, dos provetes MC85DC e MC85A, ensaiados após os 5 ciclos de imersão-secagem na solução de 10% de ácido fórmico.

Tabela 6.17 – Decréscimo de tensão de cedência, extensão de cedência e módulo de elasticidade dos provetes MC85DC e MC85A ao 5º ciclo de imersão-secagem em ácido fórmico.

Provete	Tensão de Cedência	Extensão de Cedência	Módulo de Elasticidade
MC85DC	23,3%	16,6%	35,2%
MC85A	37,6%	9,8%	37,0%

Constata-se da análise das Figuras 6.33 e 6.34 e da Tabela 6.17 que a imersão na solução de ácido fórmico provocou perda de resistência à compressão nos provetes MC85DC e MC85A. A maior perda de resistência foi observada nos provetes com cortiça como agregado (MC85A), em cerca de 38%, sendo a perda observada nos provetes com borracha de cerca de 23%.

Em relação aos valores de extensão de cedência, observou-se que a imersão na solução de ácido fórmico provocou um decréscimo do seu valor tanto nos provetes de borracha como nos de cortiça. O maior decréscimo verificou-se nos provetes MC85DC em 16,55%, enquanto que o decréscimo verificado nos provetes MC85A foi de 9,77%.

Da análise da Tabela 6.17, constata-se que o maior decréscimo do valor do módulo de elasticidade foi observado nos provetes de cortiça, em cerca de 37%, porém, a diferença para o decréscimo do valor nos provetes com borracha foi de apenas de cerca de 2%.

Da análise da Tabela 6.15, constata-se que a tensão a 35% de extensão também sofreu um decréscimo, em 8,96% nos provetes MC85DC e em 19,3% nos provetes MC85A, mantendo-se assim a mesma relação encontrada no decréscimo do valor da tensão de cedência, ou seja, com os provetes de cortiça a sofrerem uma maior perda. Contudo, a diferença de valores da tensão a 35% de extensão dos 0 para os 5 ciclos, para ambos os tipos de agregado, foi inferior à diferença encontrada nos valores de tensão de cedência.

As Figuras 6.35 e 6.36 apresentam os diagramas tensão – deformação dos ensaios de compressão monotónica aos provetes com resina IC (IC95DC e IC95A), que serviram de base para a construção das Tabelas 6.18 a 6.21 nas quais se apresentam os valores obtidos em cada provete para a tensão de cedência ( $f_c$ ), extensão de cedência ( $\epsilon_{pct}$ ), tensão a 25% de extensão ( $f_{r,25\%}$ ) e do módulo de elasticidade (E), respectivamente, e correspondentes valores médios dos provetes de controlo, que não sofreram degradação, e dos provetes retirados ao fim de 5 ciclos de imersão-secagem na solução de 10% de ácido fórmico.

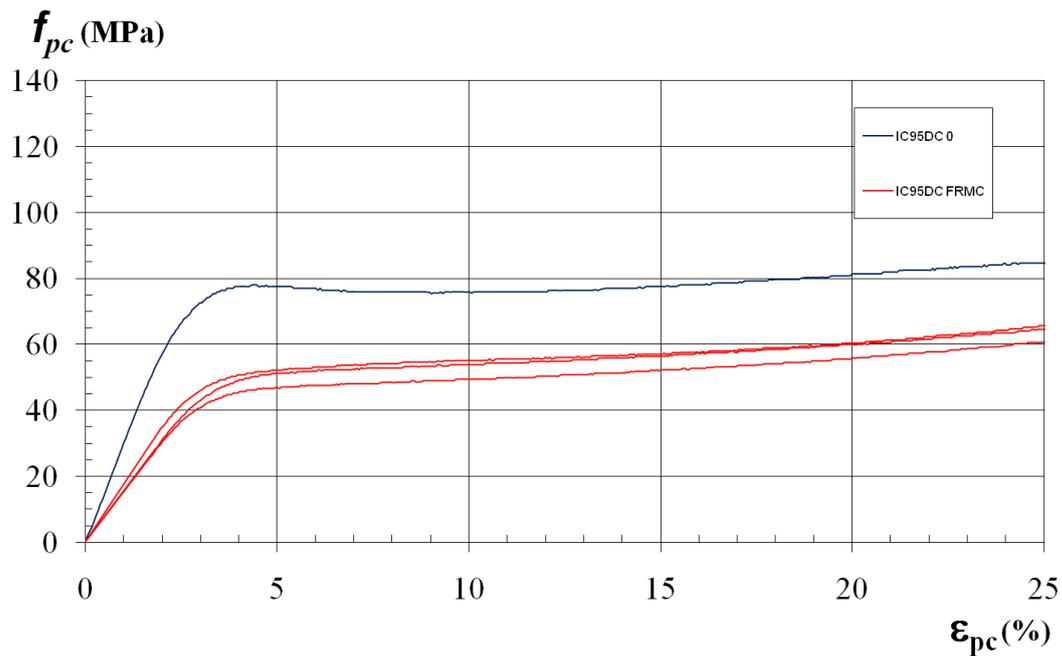


Figura 6.35 – Diagrama tensão deformação do ensaio à compressão monotónica aos 0 e aos 5 ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico dos provetes IC95DC.

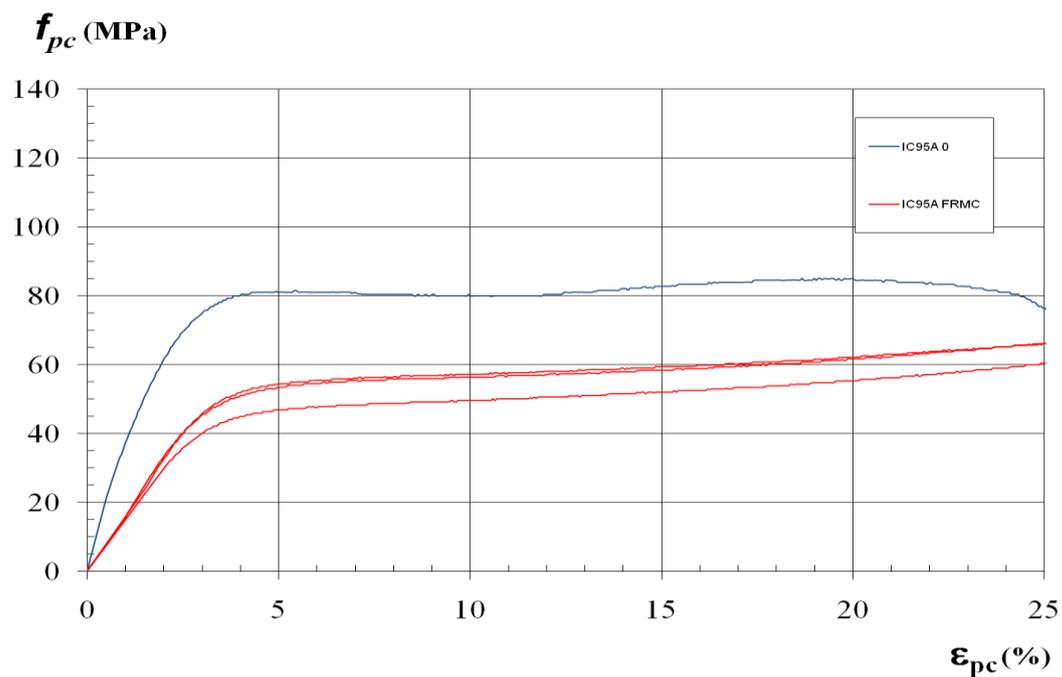


Figura 6.36 – Diagrama tensão deformação do ensaio à compressão monotónica aos 0 e aos 5 ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico dos provetes IC95A.

Tabela 6.18 – Tensão de cedência aos 0 e aos 5 ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico dos provetes IC95DC e IC95A.

	proвете	0 ciclos	5 ciclos	
		$f_{pct,i}$ (MPa)	$f_{pct,i}$ (MPa)	$f_{pct,m}$ (MPa)
Tensão de Cedência	IC95DC-1	76,9	49,3	46,4
	IC95DC-2		43,4	
	IC95DC-3		46,7	
	IC95A-1	80,4	50,1	48,2
	IC95A-2		44,0	
	IC95A-3		50,6	

Tabela 6.19 – Extensão de cedência aos 0 e aos 5 ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico dos provetes IC95DC e IC95A.

	proвете	0 ciclos	5 ciclos	
		$\varepsilon_{pct,i}$ (%)	$\varepsilon_{pct,i}$ (%)	$\varepsilon_{pct,m}$ (%)
Extensão de Cedência	IC95DC-1	3,7	3,6	3,5
	IC95DC-2		3,4	
	IC95DC-3		3,6	
	IC95A-1	4,0	3,7	3,7
	IC95A-2		3,7	
	IC95A-3		3,8	

Tabela 6.20 – Tensão a 25% de extensão aos 0 e aos 5 ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico dos provetes IC95DC e IC95A.

	proвете	0 ciclos	5 ciclos	
		$f_{r,i,25\%}$ (MPa)	$f_{r,i,25\%}$ (MPa)	$f_{r,m,25\%}$ (MPa)
Tensão a 25% de Extensão	IC95DC-1	84,6	65,7	63,7
	IC95DC-2		60,7	
	IC95DC-3		64,6	
	IC95A-1	76,3	66,0	64,2
	IC95A-2		60,4	
	IC95A-3		66,1	

Tabela 6.21 – Módulo de elasticidade aos 0 e aos 5 ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico dos provetes IC95DC e IC95A.

	provete	0 ciclos	5 ciclos	
		$E_i$ (GPa)	$E_i$ (GPa)	$E_m$ (GPa)
Módulo de Elasticidade	IC95DC-1	3,00	1,86	1,50
	IC95DC-2		1,42	
	IC95DC-3		1,21	
	IC95A-1	4,05	1,68	1,55
	IC95A-2		1,46	
	IC95A-3		1,52	

Através dos dados obtidos nas tabelas anteriores, construiu-se a Tabela 6.22 que apresenta o decréscimo da tensão de cedência, extensão de cedência e módulo de elasticidade, em percentagem, dos provetes IC95DC e IC95A, ensaiados após os 5 ciclos de imersão-secagem na solução de 10% de ácido fórmico.

Tabela 6.22 – Decréscimo de tensão de cedência, extensão de cedência e módulo de elasticidade dos provetes IC95DC e IC95A ao 5º ciclo de imersão-secagem em ácido fórmico.

Provete	Tensão de Cedência	Extensão de Cedência	Módulo de Elasticidade
IC95DC	39,6%	5,0%	50,1%
IC95A	40,0%	7,3%	61,7%

Observando a Tabela 6.22 constata-se que os ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico provocaram grandes alterações a nível de resistência à compressão dos provetes IC95DC e IC95A. Verifica-se que ambos os tipos de agregado obtiveram decréscimo na tensão de cedência praticamente igual, de cerca de 40%, sendo superior ao verificado nos provetes de resina MC cujo maior decréscimo foi de cerca de 37% nos provetes MC85DC.

Relativamente ao decréscimo do valor da extensão de cedência, verifica-se que o maior decréscimo, ao contrário do sucedido nos provetes de resina MC-DUR 1390 VK, ocorreu nos provetes de borracha, em cerca de 5%. Os provetes IC95A sofreram um decréscimo de 7,34%.

O valor do módulo de elasticidade também sofreu grandes alterações, tanto nos provetes de borracha como nos provetes com cortiça. Mais uma vez, foram os provetes de cortiça que sofreram o maior decréscimo, com o valor de 61,7%.

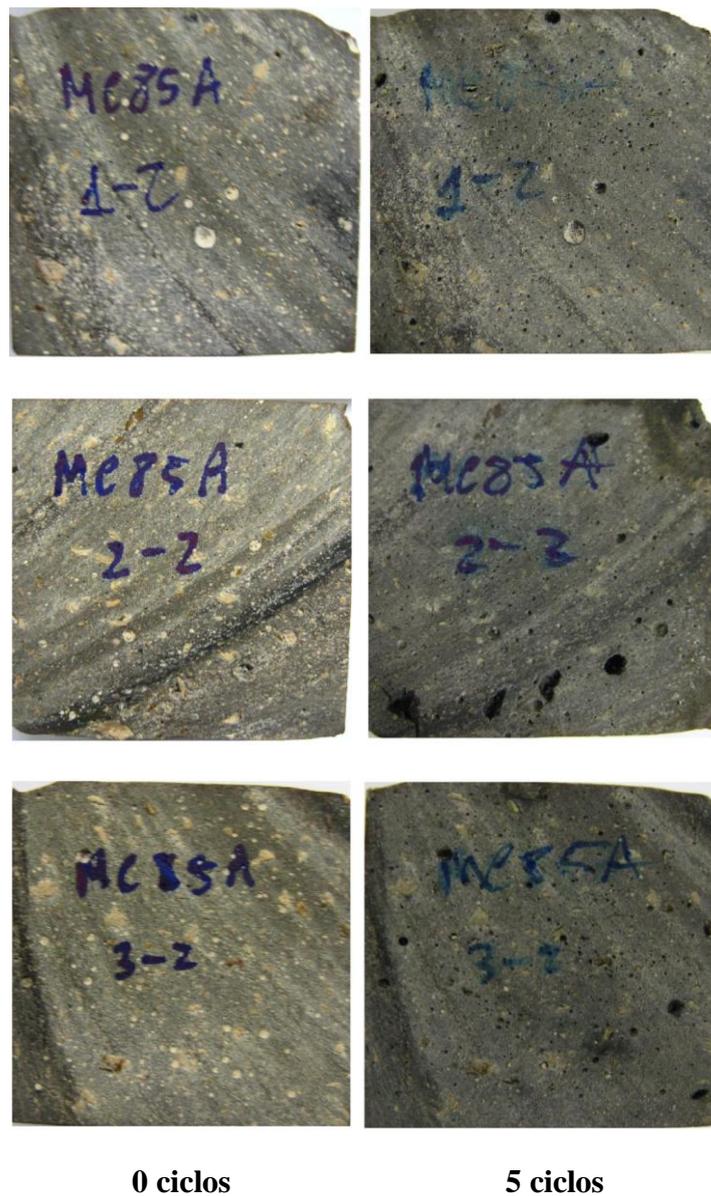
Relativamente à tensão a 25% de extensão, verifica-se que os provetes IC95DC tiveram um decréscimo de 24,74% e os provetes IC95A de 15,88%. A explicação para os provetes com cortiça terem obtido um menor decréscimo pode ser obtida observando a Figura 6.35, na qual se verifica que os provetes 0 começam a atingir a rotura pouco antes do valor da extensão chegar aos 25%, enquanto que os provetes que sofreram a degradação do ácido fórmico, as tensões em fase plástica continuam a aumentar para além dos 25% de extensão.

### **6.2.2.3 ALTERAÇÕES NA COR E TEXTURA**

As Figuras 6.37 e 6.38 apresentam a fotos comparativas entre os provetes MC85DC e MC85A, respectivamente, antes de serem imersos em ácido fórmico e após o 5º ciclo de imersão-secagem.



*Figura 6.37 – Foto comparativa entre os provetes MC85DC aos 0 e aos 5 ciclos (Escala 1:0,8).*



*Figura 6.38 – Foto comparativa entre os provetes MC85A aos 0 e aos 5 ciclos  
(Escala 1:0,8)*

As Figuras 6.37 e 6.38 permitem constatar que o ácido fórmico provocou grandes alterações na textura e na cor dos provetes. Os provetes MC85DC sofreram uma mudança de cor para um tom esverdeado e os provetes MC85A retirados ao 5º ciclo apresentaram uma tonalidade mais escura que os originais. Além da mudança de cor, todos os provetes imersos na solução de ácido fórmico apresentaram uma textura mais porosa, tendo inclusive aparecido algumas cavidades nos provetes MC85A.

As Figuras 6.39 e 6.40 apresentam a fotos comparativas entre os provetes IC95DC e IC95A antes de serem imersos em ácido fórmico e após o 5º ciclo de imersão-secagem.



**0 ciclos**

**5 ciclos**

*Figura 6.39 – Foto comparativa entre os provetes IC95DC aos 0 e aos 5 ciclos (Escala 1:0,8).*



*Figura 6.40 – Foto comparativa entre os provetes IC95A aos 0 e aos 5 ciclos  
(Escala 1:0,8)*

Tal como ocorreu nos provetes MC85DC e MC85A, os provetes IC95DC e IC95A apresentaram uma cor mais escura após os 5 ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico. De igual forma, também se verificou uma textura mais porosa em todos os provetes, tendo também aparecido pequenos furos, tanto nos provetes IC95DC como nos provetes IC95A.

### 6.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Em relação aos ciclos de molhagem-secagem em ambiente salino, verificou-se com a realização do trabalho experimental que estes ciclos provocaram um decréscimo da resistência, tanto à tracção por flexão como à compressão monotónica em todos tipos de provetes estudados. Constata-se desta forma que o ambiente salino e temperaturas relativamente altas fazem diminuir o desempenho mecânico deste tipo de material. Outros autores chegaram ao mesmo tipo de conclusões ao realizarem ensaios em que sujeitaram provetes de argamassas poliméricas a temperaturas altas [43,44,46,48,51,54 e 56], a ambiente salino [44,52] e a ciclos de molhagem-secagem em água do mar[45].

Relativamente aos ciclos de molhagem-secagem em ambiente ácido, vários autores observaram uma perda de massa muito pouco significativa dos provetes de betão polimérico imersos em soluções ácidas [55,61 e 62]. Reis verificou no seu estudo [63] o mesmo que foi observado neste trabalho experimental, ou seja uma percentagem de perda de capacidade resistente à compressão muito elevada dos provetes imersos em ácido fórmico, sendo inclusive o tipo de ácido no qual se verificou a maior perda de resistência à compressão dos provetes de betão polimérico.

## Capítulo 7

### CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Neste capítulo apresenta-se uma síntese das principais conclusões referidas ao longo deste trabalho, assim como um resumo dos principais aspectos nele desenvolvidos. São também salientados alguns temas que poderão ser objecto de desenvolvimentos futuros.

#### 7.1 SÍNTESE GLOBAL

No capítulo 1 elaborou-se uma abordagem histórica acerca do uso de betão polimérico e enumeraram-se as suas principais características, aplicações e limitações. Neste capítulo apresentou-se o conceito de polímero em geral, particularizando depois para a estrutura molecular, métodos de utilização e propriedades das resinas epoxídicas. Foram também referidas as vantagens do uso de agregados leves em engenharia civil, assim como a sua origem e principais características.

No capítulo 2 apresentaram-se os aspectos gerais acerca da durabilidade do betão, referindo-se os principais meios de ataque às estruturas de betão pelo meio ambiente. Entrando mais no âmbito do presente trabalho, foram referidos também os principais factores de degradação dos polímeros.

O capítulo 3 referiram-se alguns ensaios elaborados por diversos autores de modo a avaliar as características mecânicas de argamassas poliméricas e foram referidos os ensaios realizados de modo a caracterizar o comportamento destas face a vários agentes ambientais.

O capítulo 4 tratou da caracterização das resinas epoxídicas e agregados leves utilizados (pó de cortiça e pó de borracha DC-8000 e dos respectivos ensaios de caracterização da sua granulometria.

Apresentou-se no capítulo 5 a descrição da preparação dos provetes e dos ensaios de durabilidade efectuados: ciclos de molhagem-secagem em ambiente salino e em ambientes ácidos (sulfúrico e fórmico)

No capítulo 6 fez-se uma análise dos resultados dos ensaios experimentais.

## **7.1 – CONCLUSÕES**

Apresenta-se a seguir uma síntese das principais conclusões e recomendações resultantes do estudo realizado.

### **7.1.1 MATERIAIS**

Os ensaios de tracção por flexão e de compressão monotónica realizados aos provetes de referência, sem envelhecimento (0 ciclos), permitiram concluir:

- A resistência à tracção por flexão bem como a resistência à compressão são sempre superiores nos provetes com pó de borracha, para ambos os tipos de resina, comparativamente aos provetes com pó de cortiça;
- Os provetes com resina IC mostraram maior resistência à tracção por flexão e à compressão monotónica quando comparados com os análogos com resina MC;
- Os provetes com pó de borracha apresentaram valores de módulo de elasticidade maiores, tanto nos ensaios à tracção por flexão, como nos ensaios de compressão monotónica;
- Os módulos de elasticidade dos provetes com resina IC, tanto à tracção por flexão como à compressão, foram sempre superiores comparativamente aos provetes análogos com resina MC;

- Nos provetes de resina MC, a extensão de rotura à tracção é superior nos provetes com pó de borracha, porém, nos provetes com resina IC, a extensão de rotura à tracção é superior nos provetes com pó de cortiça;

### **7.1.2 CICLOS DE MOLHAGEM-SECAGEM EM AMBIENTE SALINO**

O ensaio de molhagem-secagem em ambiente salino consistiu em submeter os provetes MC85DC, MC85A, IC85DC e IC85A a ciclos automáticos de imersão de 2 horas em água salgada, 20 horas de secagem a 50 °C e arrefecimento à temperatura ambiente durante 2 horas, perfazendo assim um ciclo com a duração de 24 horas. Foram retirados provetes aos 60 ciclos e aos 120 ciclos, sendo deixados a secar numa estufa a 40 °C durante 7 dias sendo posteriormente pesados e ensaiados à tracção ou à compressão.

A avaliação da perda de massa dos provetes retirados neste ensaio de envelhecimento artificial permitiu retirar as seguintes conclusões:

- Todos os provetes retirados sujeitos ao ensaio de molhagem-secagem em ambiente salino sofreram perda de massa, sendo, em todos os casos, superior nos provetes retirados aos 120 ciclos;
- A maior perda de massa foi verificada nos provetes com resina MC-DUR 1390 VK com cortiça em cerca de 0,26% aos 120 ciclos;
- O tipo de agregado mais afectado em termos de perda de massa foi a cortiça, verificando-se que, para ambos os tipos de resina, os provetes com este tipo de agregado sofreram sempre maiores perdas de massa que os provetes com pó de borracha do mesmo tipo de resina;
- Os provetes com resina MC sofreram sempre maiores perdas de massa que os análogos em resina IC.

Dos ensaios à tracção por flexão dos provetes retirados a este tipo de envelhecimento artificial retiraram-se as seguintes ilações:

### Tensão de rotura

- Os ciclos de molhagem-secagem provocaram um decréscimo do valor de tensão de rotura à tracção por flexão em todos os provetes, sendo este valor progressivamente menor à medida que os ciclos avançavam;
- A borracha DC-8000 foi o tipo de agregado mais afectado pelos ciclos demolhagem-secagem, registando-se sempre perdas superiores em resistência à tracção por flexão que os provetes com cortiça, para o mesmo tipo de resina;
- O tipo de resina mais afectado foi a resina MC cujos provetes obtiverem sempre maiores perdas de resistência à tracção por flexão que os análogos em resina ICOSIT KC220/60.

### Extensão na rotura

- Os ciclos de envelhecimento artificial por molhagem-secagem provocaram um aumento da extensão na rotura em todos os provetes;
- Verificou-se que o maior aumento de extensão na rotura ocorreu nos provetes IC85DC, seguido pelos provetes MC85DC, concluindo-se que a borracha DC-8000 foi o agregado mais afectado também em termos de valores de extensão na rotura;
- Observou-se que os provetes com resina IC obtiveram um maior aumento de extensão na rotura, aos 120 ciclos, que os análogos em resina MC.

### Módulo de elasticidade

- Foi observado que os ciclos de molhagem-secagem provocaram um decréscimo dos valores de módulo de elasticidade ao longo dos ciclos estudados em todos os provetes ensaiados;

- Para o mesmo tipo de resina, os provetes com borracha DC-8000 foram os que sofreram um maior decréscimo de valor de módulo de elasticidade que os provetes com cortiça;
- Aos 120 ciclos, os provetes com resina IC obtiveram um maior decréscimo do valor de módulo de elasticidade que os análogos com resina MC.

Dos ensaios à compressão monotónica dos provetes sujeitos aos ciclos de molhagem-secagem em ambiente salino retiraram-se as seguintes ilações:

#### Tensão de cedência

- Os ciclos de molhagem-secagem provocaram um decréscimo nos valores de tensão de cedência em todos os provetes estudados, sendo esta progressivamente menor ao longo dos ciclos estudados;
- O maior decréscimo aos 60 e aos 120 ciclos foi verificado nos provetes MC85DC;
- Os provetes com resina MC sofreram um decréscimo maior dos valores de tensão de cedência que os análogos com resina IC;
- Para o mesmo tipo de resina, os provetes com borracha sofreram um maior decréscimo de tensão de cedência que os provetes com cortiça, quer aos 60 ciclos quer aos 120 ciclos.

#### Extensão de cedência

- Os ciclos de molhagem-secagem em ambiente salino provocaram uma diminuição dos valores de extensão de cedência dos provetes de resina MC e um aumento da extensão de cedência dos provetes de resina IC;
- O maior decréscimo dos valores de extensão de cedência foi verificado nos provetes MC85DC (borracha), aos 60 ciclos e aos 120 ciclos;

- O maior aumento dos valores de extensão de cedência foi verificado nos provetes de IC85A (cortiça), aos 60 ciclos e aos 120 ciclos.

#### Módulo de elasticidade

- Tal como ocorreu no ensaio de tracção por flexão, verificou-se uma diminuição dos valores de módulo de elasticidade à compressão em todos os provetes, sendo progressivamente menor ao longo dos ciclos estudados;
- Observou-se que os provetes com resina IC sofreram um maior decréscimo dos valores de módulo de elasticidade que os análogos com resina MC;
- Para o mesmo tipo de resina, os provetes com borracha apresentaram sempre um maior decréscimo dos valores de módulo de elasticidade, com excepção para os provetes IC85DC que, aos 60 ciclos tiveram um menor diminuição que os provetes IC85A.

### **7.1.3 DEGRADAÇÃO DEVIDO AO EFEITO DOS ÁCIDOS**

#### **7.1.3.1 ÁCIDO SULFÚRICO**

O estudo da degradação devido à acção do ácido sulfúrico consistiu em imergir provetes de resina MC com 15% de peso em borracha DC-8000 (MC85DC) em várias concentrações de ácido sulfúrico (5%, 10%, 15%, 20% e 30%) durante 7 dias sendo posteriormente colocados a secar numa estufa durante 7 dias a 40°C. Ao serem retirados da estufa os provetes foram pesados e imersos novamente nas respectivas soluções de ácido sulfúrico. Foram efectuados 5 ciclos de imersão-secagem. Este estudo permitiu retirar as seguintes ilações:

- A imersão em ácido sulfúrico não provocou alterações significativas na massa dos provetes, sendo a maior perda de massa a verificada ao fim de 5 ciclos de imersão na solução de 30% de ácido sulfúrico, com um valor 0,43%;
- Verificou-se que quanto maior era a concentração de ácido sulfúrico, maior foi a perda de massa ao fim dos 5 ciclos, apesar de, a partir do 3º ciclo, a

perda de massa de todos os provetes é semelhante, qualquer que seja a concentração de ácido utilizada;

- Apesar de não se terem verificado alterações na textura dos provetes, observou-se que a imersão em ácido sulfúrico provocou uma pequena descoloração nos provetes, não se observando nenhuma correlação entre o aumento da concentração em ácido sulfúrico e a descoloração observada, pois a maior descoloração ocorreu nos provetes imersos na solução de 5% de ácido sulfúrico.

### **7.1.3.2 ÁCIDO FÓRMICO**

O estudo da degradação devido ao efeito do ácido fórmico consistiu em imergir provetes prismáticos de dimensões 40x40x40 mm do tipo MC85DC, MC85A, IC95DC, IC95A numa solução de ácido fórmico com a concentração de 10%. Os provetes foram submetidos aos mesmos ciclos de imersão-secagem efectuados no estudo do efeito da imersão em ácido sulfúrico. Os provetes, ao fim dos 5 ciclos foram ensaiados à compressão monotónica.

Em relação à avaliação da perda de massa dos provetes imersos em ácido fórmico, as seguintes ilações foram retiradas:

- Todos os provetes apresentaram perda de massa ao longo dos ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico, sendo progressivamente maior à medida que os ciclos avançavam;
- Para o mesmo tipo de resina, os provetes com cortiça, ao fim dos 5 ciclos, apresentaram maior perda de massa que os provetes com borracha;
- A perda de massa dos provetes MC85DC imersos em ácido fórmico foi muito superior à perda de massa verificada nos provetes MC85Dc imersos em ácido sulfúrico;
- Os provetes de resina IC sofreram maior perda de massa que os provetes de resina MC, sendo o maior valor de 4,08% nos provetes IC95A.

Dos ensaios à compressão monotónica dos provetes após os 5 ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico, retiraram-se as seguintes conclusões:

#### Tensão de cedência

- Verificou-se que os ciclos de imersão-secagem provocaram uma diminuição dos valores de tensão de cedência em todos os provetes estudados.
- Entre os provetes MC85DC e MC85A, os provetes de cortiça foram os que apresentaram o maior decréscimo de valores de tensão de cedência, sendo a diferença para o decréscimo verificado nos provetes de borracha de 17,39%;
- Entre os provetes IC95DC e IC95A, os provetes com cortiça foram os que apresentaram o maior decréscimo de valores de tensão de cedência, apesar de a diferença para o decréscimo verificado nos provetes de borracha ser de apenas 0,43%.

#### Extensão de cedência

- Constatou-se que os ciclos de imersão-secagem em ácido fórmico provocaram um decréscimo da extensão de cedência em todos os provetes estudados;
- Dentro dos provetes com resina MC (MC85DC e MC85A), os com borracha foram os que sofreram um maior decréscimo de extensão de cedência;
- Dentro dos provetes com resina IC (IC95DC e IC95A), os com cortiça foram os que sofreram um maior decréscimo de extensão de cedência.

#### Módulo de elasticidade

- Verificou-se que, dentro dos provetes com resina MC, os provetes com cortiça foram os que sofreram um maior decréscimo, apesar de a diferença para o decréscimo dos valores de módulo de elasticidade dos provetes com borracha ser de apenas 1,91%;
- Dentro dos provetes com resina IC, também foram os provetes com cortiça a apresentar um maior decréscimo de módulo de elasticidade, sendo a diferença

para o decréscimo verificado nos provetes com borracha de 11,59%, ou seja, bastante superior à diferença entre os provetes de resina MC.

## **7.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Para além dos trabalhos experimentais realizados na presente dissertação, torna-se importante realizar mais ensaios de durabilidade que permitam conhecer melhor o comportamento de argamassas poliméricas de agregados leves face a diversas condições de degradação. Poderão efectuar-se estudos acerca do comportamento de argamassas poliméricas de agregados leves noutros tipos de soluções degradativas, tanto ácidas como básicas, com diferentes concentrações. Outro possível estudo poderá ser o efeito do nevoeiro salino e temperatura, em separado e avaliar o seu comportamento mecânico de modo a averiguar qual destas condições ambientais é mais degradativa para o material em estudo.

De modo a melhor conhecer este tipos de materiais, será importante também efectuar os mesmos estudos realizados neste trabalho, assim como os referidos anteriormente para diferentes proporções de resina/agregado, de modo a poder avaliar qual a verdadeira influência da quantidade de agregado na durabilidade de argamassas poliméricas de agregados leves.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ohama, Y. (1995). "*Handbook of polymer modified concrete and mortars.*" Properties and Process Technology – Noyes Publications.
- [2] Monteiro, D. F. (2005). "*Comportamento à fractura e à fluência de betões poliméricos.*" Dissertação de Doutoramento apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia.
- [3] Ferreira, A. J. M. (2001) "*Introdução aos Betões e Argamassas poliméricas.*" Apontamentos para a Disciplina de Novos Materiais.
- [4] Portal Pisos Industriais. Disponível em: <http://pisosindustriais.com.br/materias/noticia.asp?ID=39>. Acesso em: Março 2010.
- [5] Wikipedia. Disponível em <http://en.wikipedia.org/wiki/polymer>. Acesso Abril 2010.
- [6] Pham H. Q; Marks M. J. "*Epoxy Resins.*"
- [7] Barroso A.; Camões A. "Revestimentos Poliméricos."
- [8] Catalani, A.; Bonicelli, M. G. (2005). "*Kinetics of the curing reaction of a diglycidyl ether of bisphenol A with a modified polyamine.*" *Thermochimica Acta*, v.438, n.1-2, p. 126-129.
- [9] Schmidt, T. M. (2005) "*Soquetagem de Cabos de Fibra Poliéster com Resina Epoxi.*" Dissertação (Mestrado em Engenharia – Tecnologia e Ciência dos Materiais) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- [10] Lakshmi, M. S.; Srividhya, M.; Reddy, B. S. R. (2003) "New Epoxy Resins Containing Hard-soft Segments: Synthesis, Characterization and Modification Studies for High Performance Applications." *Journal of Polymer Research*, Chennai, India, v.10, p. 259-266.
- [11] Ramos, J. A.; Pagani, N.; Riccardi, C. C.; Borrajo, J.; Goyanes, S. N.; Mondragon, I. (2005) "Cure kinetics and shrinkage model for epoxy-amine systems." *Polymer* v.46, n.10, p. 3323-3328.

- [12] Rosu, D.; Cascaval, C. N.; Mustata, F.; Ciobanu, C. (2002) “Cure kinetics of epoxy resins studied by non-isothermal DSC data.” *Thermochimica Acta* v.383, n.1- 2, p. 119
- [13] Nara G. Berrya; Fábio L. Barciab; Bluma G. Soraesb; Ana Cristina Fontes Moreira; Thiago Paulo Amaral, José Roberto M.d’Almeida (2002). “*Avaliação da degradação térmica da resina epoxi pura e modificada.*” Conferência de tecnologia de Equipamentos Salvador – Bahia
- [14] Martins Silva B. M. (2007). “*Betão Leve Estrutural Com Agregados de Argila Expandida.*” Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de Mestre em Estruturas de Engenharia Civil
- [15] Vieira, F. P. K., Marlova P.; Dal Molin, Denise; Vilela, Antônio C. F. (1997). “*Estudos de durabilidade em concretos e argamassas com adição de microssilica.*” *Revista EGATEA* 25(2): 9.
- [16] Gaier, C.V. (2005) “*Estudo do Ataque Ácido em Materiais de Reparo Industrializados para Estruturas de Concreto.*” Trabalho de Diplomação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Mestrado Profissionalizante em Engenharia, Escola de Engenharia, UFRGS, Porto Alegre.
- [17] Helene, P.; Moreira, H. P.; Figueiredo, E. P. (2001). “*Avaliação da influência de alguns agentes agressivos na resistência à compressão de concretos amassados com diferentes tipos* *Boletim Técnico.:de cimentos brasileiros*”. São Paulo Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/286, 2001. 17 p
- [18] Antoniazzi, J. P. “*Patologia da Construção: abordagem e diagnóstico.*” Universidade Federal de Santa Maria.
- [19] American Concrete Institute (1992). “*Guide to Durable Concrete.*” Reported by ACI Committee 201, Detroit, p. 544-574.
- [20] Rissari Bissa, R. C. (2008). “*Sistemas de impermeabilização e protecção de estruturas de concreto armado de reservatórios de água tratada atacada por cloretos.*” Monografia apresentada a Escola de Engenharia da UFMG como requisito final para a obtenção do título de Especialista no Curso de Especialização em Construção Civil.

- [21] Ferreira, R. M. (2000). “*Avaliação dos ensaios de durabilidade do betão.*” Dissertação apresentada à escola de engenharia do Minho para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil – Materiais e Reabilitação da Construção.
- [22] Wikipedia. Disponível em [http://pt.wikipedia.org/wiki/Ácido\\_fórmico](http://pt.wikipedia.org/wiki/Ácido_fórmico). Acesso Abril 2010.
- [23] Pazini Figueiredo, E. J. (1989). “*Metedologia de avaliação de sistemas epoxi destinados à injeção de fissuras passivas das estruturas de concreto.*” Dissertação apresentada ao corpo docente do curso de Pós Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.
- [24] R.L. Islander, J.S. Devanny, F. Mansfeld, A. Postyn, H. Shih (1991). “*Microbial Ecology of Crown Corrosion in Sewers.*” *Journal of Environmental Engineering* 117(6): 751-770.
- [25] Singh, B. and N. Sharma (2008). “*Mechanistic implications of plastic degradation.*” *Polymer Degradation and Stability*” 93(3): 561-584.
- [26] Chastre Rodrigues, C.; Silva, M. A. G. “*Cyclic Compression behavior of polymer concrete*” *Journal of Polymer Engineering*, 27(7):525, 2007.
- [27] Martinez-Ramirez, S., A. Zamarad, et al. (2002). “*Organic and inorganic concrete under SO2 pollutant exposure.*” *Building and Environment* 37(10): 933-937.
- [28] Rukin, V. V., N. V. Dmitriev, et al. (1988). “*Polymer-cement shotcrete at the construction of the Dangara hydraulic tunnel.*” *Power Technology and Engineering (formerly Hydrotechnical Construction)* 22(7): 390-394.
- [29] Ribeiro MCS, Reis JML, Ferreira AJM, Marques AT. “*Thermal expansion of epoxy and polyester polymer mortars—plain mortars and fibre-reinforced mortars*”. *Polymer Test* 2003;22:849–57.
- [30] Davydov, S.S., and Ivanov, A. M. (1972) “*Steel Polymer Concrete Strutral Construction*”, Stroizdat Publishers, Moscow.

- [31] C. M. L. Tavares, M. C. S. Ribeiro, D. Monteiro, P. P. Camanho, A. J. M. Ferreira. (2001), “ *Experimental Investigation into the static and fatigue behavior of polymer concrete reinforced with GFRP rods* “. Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Composites in Constructions, Figueiras et al, pp 329-333.
- [32] Ferreira, A. J. M. (2001) "*Introdução aos Betões e Argamassas poliméricas.*" Apontamentos para a Disciplina de Novos Materiais.
- [33] Gorninski, J. P., D. C. Dal Molin, et al. (2004). "*Study of the modulus of elasticity of polymer concrete compounds and comparative assessment of polymer concrete and portland cement concrete.*" Cement and Concrete Research 34(11): 2091-2095.
- [34] Jo, Y. K. (2008). "*Basic properties of epoxy cement mortars without hardener after outdoor exposure.*" Construction and Building Materials 22(5): 911-920.
- [35] Bignozzi, M. C., A. Saccani, et al. (2000). "*New polymer mortars containing polymeric wastes. Part I. Microstructure and mechanical properties.*" Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 31(2): 97-106.
- [36] Nóvoa, P. J. R. O., M. C. S. Ribeiro, et al. (2004). "*Mechanical characterization of lightweight polymer mortar modified with cork granulates.*" Composites Science and Technology 64(13-14): 2197-2205.
- [37] Varughese, K. T. and B. K. Chaturvedi (1996). "*Fly ash as fine aggregate in polyester based polymer concrete.*" Cement and Concrete Composites 18(2): 105-108.
- [38] Rossignolo, J. A. and M. V. C. Agnesini (2002). "*Mechanical properties of polymer-modified lightweight aggregate concrete.*" Cement and Concrete Research 32(3): 329-334.
- [39] Silva, L. M., R. A. Ribeiro, et al. "*Role of lightweight fillers on the properties of a mixed-binder mortar.*" Cement and Concrete Composites 32(1): 19-24.
- [40] Srivastava, V. K.; Shembekar, P. S. “*Tensile and fracture properties of epoxy resin filled with flyash particles*” Journal of Materials Science, vol. 25, issue 8, pp. 3513-3516

- [41] McEwan, I., R. A. Pethrick, et al. (1999). "*Water absorption in a rubber-modified epoxy resin; carboxy terminated butadiene acrylonitrile-amine cured epoxy resin system.*" *Polymer* 40(15): 4213-4222.
- [42] Reis, J. M. L. and A. J. M. Ferreira (2005). "*Effect of marine exposure on fracture properties of epoxy concretes.*" *Polymer Testing* 24(1): 121-125.
- [43] Mahdi, F., A. A. Khan, et al. (2007). "*Physiochemical properties of polymer mortar composites using resins derived from post-consumer PET bottles.*" *Cement and Concrete Composites* 29(3): 241-248.
- [44] Silva, M. A. G., Z. C. G. Silva, et al. (2007). "*Petrographic and mechanical aspects of accelerated ageing of polymeric mortars.*" *Cement and Concrete Composites* 29(2): 146-156.
- [45] H. Toutanji and P. Balaguru (1998) "*Durability characteristics of concrete columns wrapped with FRP tow sheets*". *J. Mater. Civ. Eng.* 10 1, pp. 52–57
- [46] Pardo A, Maribona IRZ, Urreta J, San Jos\_e JT, Muguerza A (1995) "*Influence of dosage and temperature on mechanical properties of polymer concrete.*" In: *Proceedings of the Eighth International Congress on Polymers in Concrete*, Oostende, Belgium.
- [47] Reis, J. M. L. and A. J. M. Ferreira (2006). "*Freeze-thaw and thermal degradation influence on the fracture properties of carbon and glass fiber reinforced polymer concrete.*" *Construction and Building Materials* 20(10): 888-892.
- [48] Ribeiro, M. C. S., P. R. Nóvoa, et al. (2004). "*Flexural performance of polyester and epoxy polymer mortars under severe thermal conditions.*" *Cement and Concrete Composites* 26(7): 803-809.
- [49] Aggarwal, L. K., P. C. Thapliyal, et al. (2007). "*Properties of polymer-modified mortars using epoxy and acrylic emulsions.*" *Construction and Building Materials* 21(2): 379-383.
- [50] Shaker, F. A., A. S. El-Dieb, et al. (1997). "*Durability of Styrene-Butadiene latex modified concrete.*" *Cement and Concrete Research* 27(5): 711-720.

- [51] El-Hawary, M. M. and H. Abdel-Fattah "*Temperature effect on the mechanical behavior of resin concrete.*" Construction and Building Materials 14(6-7): 317-323.
- [52] El-Hawary, M., H. Al-Khaiat, et al. (1998). "*Effect of sea water on epoxy-repaired concrete.*" Cement and Concrete Composites 20(1): 41-52.
- [53] Soraru, G. D. and P. Tassone (2004). "*Mechanical durability of a polymer concrete: a Vickers indentation study of the strength degradation process.*" Construction and Building Materials 18(8): 561-566.
- [54] Rebeiz, K. S. (1996). "*Precast use of polymer concrete using unsaturated polyester resin based on recycled PET waste.*" Construction and Building Materials 10(3): 215-220.
- [55] MCS Ribeiro, CML Tavares, AJM Ferreira, "*Chemical resistance of epoxy and polyester polymer concrete to acids and salts*", Journal of Polymer Engineering
- [56] Cardwell, B. J. and A. F. Yee (1993). "*Rate and temperature effects on the fracture toughness of a rubber-modified epoxy.*" Polymer 34(8): 1695-1701.
- [57] Hwang, E.-H., Y. S. Ko, et al. (2008). "*Effect of polymer cement modifiers on mechanical and physical properties of polymer-modified mortar using recycled artificial marble waste fine aggregate.*" Journal of Industrial and Engineering Chemistry 14(2): 265-271.
- [58] Hwang, E.-H., Y. S. Ko, et al. (2009). "*Mechanical/physical characteristics of polymer mortar recycled from rapid-chilled steel slag.*" Journal of Industrial and Engineering Chemistry 15(5): 628-634.
- [59] Chikhi, N., S. Fellahi, et al. (2002). "*Modification of epoxy resin using reactive liquid (ATBN) rubber.*" European Polymer Journal 38(2): 251-264.
- [60] Zainuddin, S., M. V. Hosur, et al. (2009). "*Durability studies of montmorillonite clay filled epoxy composites under different environmental conditions.*" Materials Science and Engineering: A 507(1-2): 117-123.

- [61] Mohamed, A.-M. O. and M. E. Gamal (2009). "*Hydro-mechanical behavior of a newly developed sulfur polymer concrete.*" *Cement and Concrete Composites* 31(3): 186-194.
- [62] Gorninski, J. P., D. C. Dal Molin, et al. (2007). "*Strength degradation of polymer concrete in acidic environments.*" *Cement and Concrete Composites* 29(8): 637-645.
- [63] Reis, J. M. L. (2009). "*Mechanical characterization of polymer mortars exposed to degradation solutions.*" *Construction and Building Materials* 23(11): 3328-3331.
- [64] J. Liu, C. Vipulanandan (2004). "*Long-Term Performance of Epoxy Coated Clay Bricks in Sulfuric Acid.*" *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 16, No. 4, July/August 2004, pp. 349-355.
- [65] Bakharev, T., J. G. Sanjayan, et al. (2003). "*Resistance of alkali-activated slag concrete to acid attack.*" *Cement and Concrete Research* 33(10): 1607-1611.
- [66] Kurihara S., Matsushita H. and Matsui H. "*A Protection Method for Concrete Under Severe Acidic Conditions.*" *Concrete Under Severe Conditions 1: Environment and Loading.*
- [67] Rossignolo, J. A. and M. V. C. Agnesini (2004). "*Durability of polymer-modified lightweight aggregate concrete.*" *Cement and Concrete Composites* 26(4): 375-380.
- [68] De Belie, N. and J. Monteny (1998). "*Resistance of concrete containing styrol acrylic acid ester latex to acids occurring on floors for livestock housing.*" *Cement and Concrete Research* 28(11): 1621-1628.
- [69] Rodrigues, C.C. (2005). "*Comportamento às Acções Cíclicas de Pilares de Betão Armado Reforçados com Materiais Compósito.*" *Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil na Especialidade de Estruturas, Universidade Nova de Lisboa.*
- [70] MC (2005/2006). "*Protection Technologies - Product Systems.*" MC-Bauchemie.
- [71] SIKA (2007). "*Prontuário.*" *Catálogo de Fichas de Produto. Edição nº 7.*

- [72] Gil, L (2005). "*A cortiça como material de construção.*" Manual Técnico, APCOR – Associação Portuguesa de Cortiça.
- [73] Mestre, A., et al. (2006). "*Dossier Info Cortiça\_Design Cork, for future, innovation and sustainability.*"
- [74] Norma, NP 114:1996(Ed 3) "*Cortiça. Granulados. Classificação e Características.*"
- [75] Norma, NP EN 933-1 Parte 1 (2000) "*Análise Granulométrica – Método de peneiração.*"
- [76] Campos, P. d. S. (2006). "*Aproveitamento Industrial da Borracha Reciclada de Pneus Usados.*" Dissertação Para obtenção do grau de Mestre em Gestão Ambiental, Escola de Engenharia da Universidade do Minho.
- [77] RECIPEU (2007), "*Especificações técnicas. Código do produto: DC-8000, Pó Criogénico de Borracha*".
- [78] Norma, NP EN 196-1 (2006). "*Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas.*"
- [79] Ludovico Marques M. A. (2008). "*Contribuição para o conhecimento do efeito de cristalização de sais na alterabilidade de arenitos- Aplicação ao património edificado de Atouguia da Baleia.*" Dissertação apresentada para obtenção do Grau de Doutor em Geotecnia, na especialidade de Mecânica das Rochas, pela Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- [80] Norma, ASTM D 543 – 95. "*Standard Practices for Evaluating the Resistance of Plastics to Chemical Reagents.*"