

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Cristina Maria Vieira Frazão

**Durabilidade do betão auto-compactável
reforçado com fibras de aço**

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Aires Fernando Fernandes Leite
Camões de Azevedo
e do
Professor Doutor Joaquim António Oliveira de Barros

AGRADECIMENTOS

Chegando ao fim desta dissertação, cumpre-me agradecer a todos aqueles que contribuíram positivamente para a sua concretização e ajudaram a que chegasse a bom termo.

Em primeiro lugar, ao Professor Joaquim Barros, pela oportunidade e confiança na realização deste trabalho de investigação no âmbito do projeto LEGOUSE. Agradeço a orientação, o apoio, a disponibilidade, a motivação, a partilha e esclarecimento de conhecimentos científicos e a proposta de sugestões, que sempre demonstrou nos trabalhos desenvolvidos.

Ao Professor Aires Camões, pela indispensável colaboração e orientação no desenvolvimento deste trabalho. Agradeço de igual modo, a disponibilidade, o apoio e a partilha de conhecimentos e sugestões que demonstrou em todos os trabalhos realizados.

A todos os técnicos dos laboratórios de Eng.^a Civil (LMC e LEST) da UMinho, pela ajuda e apoio nos ensaios realizados, em particular ao Carlos Jesus, ao Sr. Matos e ao Marco.

Ao Laboratório de Ensaio de Materiais do Departamento de Eng^a Mecânica da UMinho, pelo apoio e ajuda na realização dos ensaios de monitorização eletroquímica, nomeadamente ao Professor Luís Rocha, ao Fernando Oliveira e em particular à Alexandra Alves. Agradeço também à Edith Avila da SEMAT pelas microscopias MEV das fibras corroídas.

À CiviTest - Pesquisa de Novos Materiais para a Engenharia Civil, Lda, pela ajuda e apoio no estudo da composição do betão, na execução das betonagens e na realização dos ensaios de flexão. Obrigada, Delfina, Frederico e Inaldo.

A todos os colegas do ISISE - Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering/DEC/UMinho, alunos de doutoramento (em especial à Inês Costa), bolseiros de investigação e pessoal administrativo, pela colaboração que sempre recebi desde o dia em que ingressei na UMinho.

À empresa Freitas & Freitas, Lda. pela execução do equipamento dos meus ensaios de arrancamento, à Stockfer pelo fornecimento dos comparadores mecânicos, à Maccaferri e Radmix pelas fibras de aço, à Sika pelo superplastificante, à Secil pelo cimento e à Omya Comital pelo Fíler calcário.

Agradeço a bolsa de investigação que me foi concedida pelo projeto LEGOUSE/UMinho.

A todos os meus amigos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a finalização deste estudo.

À minha família pelo apoio incondicional e compreensão nos momentos em que tive de me privar de a visitar e de estar com eles.

Last but not least, ao Rui pela paciência, compreensão, motivação, amor e carinho que sempre soube manifestar, mesmo nos momentos mais difíceis em que estive mais ausente.

A todos o meu muito obrigado!

RESUMO

A durabilidade é um dos aspetos mais importantes do betão devido à sua fundamental incidência na vida útil das estruturas. A investigação da durabilidade do betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA) é ainda escassa, nomeadamente, os aspetos relacionados com a resistência à corrosão, os que estão tratados de uma forma ainda incipiente, suscitando a dúvida se a corrosão das fibras pode, ou não, provocar o destacamento do betão envolvente.

Para os betões convencionais, sem adição de fibras de aço, existem indicadores de durabilidade que são de utilização corrente. Neste seguimento, desenvolveu-se um trabalho experimental com provetes de BACRFA e provetes de betão auto-compactável (BAC) sem fibras, com o objetivo de caracterizar o comportamento mecânico (módulo de elasticidade, resistência à compressão e à flexão) e avaliar os parâmetros indicadores de durabilidade (absorção de água por imersão e por capilaridade, permeabilidade ao ar e água, resistividade elétrica, difusão de cloretos por migração em regime não estacionário, resistência à penetração de cloretos por imersão e resistência à carbonatação).

No BACRFA fendilhado, a corrosão tende a ocorrer nas fibras de aço que atravessam as fissuras, provocando a redução da secção das fibras. Esta redução pode afetar negativamente o comportamento mecânico do BACRFA, podendo conduzir a uma significativa redução da resistência residual em tração e flexão. Por outro lado, os produtos da corrosão das fibras podem causar um aumento da rugosidade das fibras, melhorando o seu comportamento ao arrancamento e, conseqüentemente, a resistência à flexão do BACRFA. Deste modo, o estudo do comportamento interfacial fibra/matriz é importante para a compreensão dos efeitos da corrosão das fibras de aço no comportamento mecânico e na durabilidade das estruturas de BACRFA. Com o intuito de avaliar estes efeitos, desenvolveu-se um ensaio experimental de arrancamento de fibras de aço em BAC fendilhado, sujeitas à ação da corrosão, sendo esta avaliada por intermédio de técnicas eletroquímicas.

No geral, constata-se que em estado não fendilhado, a adição de fibras de aço não afeta significativamente os principais indicadores de durabilidade do BAC. No BACRFA fendilhado, apesar de se verificar um aumento do risco de corrosão das fibras de aço por penetração de cloretos com o aumento da abertura de fissura, verifica-se um aumento da rugosidade da fibra que melhora a força de arrancamento da fibra da matriz cimentícia.

Palavras - chave: Durabilidade, fibras de aço, BACRFA, corrosão.

ABSTRACT

Durability is one of the most important aspects of concrete due to its fundamental incidence in the serviceability working conditions of structures. Research on the durability of steel fiber reinforced self compacting concrete (SFRSCC) is still scarce, particularly in the aspects of the corrosion resistance, which is treated in an incipient form, giving doubt, for example, whether the corrosion of the fibers may or may not lead to cracking and subsequent spalling of the surrounding concrete.

For conventional concrete, without steel fibers, there are some commonly used durability indicators. For this purpose, it was carried out an experimental work with SFRSCC and SCC specimens in order to characterize their mechanical properties (elasticity modulus, compressive strength and flexural behaviour). In this experimental program it was also evaluated the following durability indicators: water absorption by immersion and by capillarity; permeability to air and water; electrical resistivity; chloride diffusion by migration under non-steady state; resistance to chloride penetration by immersion and carbonation.

In cracked SFRSCC, corrosion affects the steel fibers bridging the cracks, causing a reduction of the sectional area of the fiber. This reduction affects negatively the mechanical behavior of SFRSCC and can lead to a significant reduction in residual flexural tensile strength of SFRSCC. On the other hand, the products from the fiber's corrosion cause an increase of fibers roughness, improving fiber pullout behavior and, consequently, the SFRSCC flexural strength. Therefore, the study of the fiber/matrix interfacial behavior is important to assess the effects of steel fibers corrosion on the mechanical behavior and the durability of the SFRSCC structures. To assess these effects, pullout tests of steel fibers in cracked SCC were executed. These specimens were submitted to environmental conditions favorable to fiber corrosion, which was evaluated by applying electrochemical techniques.

From the obtained results, it appears that in non-cracked state, the addition of steel fibers does not affect significantly the main durability indicators of BAC. In cracked SFRSCC, although there is an increase in the risk of corrosion of steel fibers for penetration of chlorides by increasing the crack width, there is an increase in roughness of the fiber that improves the pullout strength from the cementitious matrix.

Keywords: Durability, steel fibers, SFRSCC, corrosion.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
ÍNDICE GERAL	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE QUADROS	xix
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
1.1 Introdução	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Estrutura da dissertação	3
CAPÍTULO 2 - ESTADO GERAL DO CONHECIMENTO	7
2.1 Introdução	7
2.2 Betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA)	7
2.2.1 Fibras de aço	8
2.2.2 Interface fibra / matriz	10
2.3 Durabilidade do betão reforçado com fibras de aço	13
2.3.1 Permeabilidade e Porosidade	13
2.3.2 Carbonatação e ação dos íões Cloreto - Efeitos da Corrosão	14
2.3.3 Resistividade elétrica	23
2.3.4 Ação do gelo - degelo	24
2.3.5 Ação dos sulfatos	25
2.3.6 Resistência ao fogo	25
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E COMPOSIÇÕES	27
3.1 Introdução	27
3.2 Materiais	27
3.2.1 Cimento	27
3.2.2 Fíler Calcário	28
3.2.3 Água	29
3.2.4 Agregados	30
3.2.5 Superplastificante	31

3.2.6	Fibras de aço.....	32
3.3	Composições de BAC e BACRFA.....	32
3.3.1	Procedimento da amassadura	35
CAPÍTULO 4 - CARACTERIZAÇÃO DO BAC E DO BACRFA.....		39
4.1	Introdução.....	39
4.2	Avaliação das propriedades do betão fresco	39
4.2.1	Ensaio de espalhamento (“ <i>Slump-flow test</i> ”).....	39
4.2.2	Ensaio na caixa L (“ <i>L-Box test</i> ”).....	41
4.2.3	Ensaio de fluidez (“ <i>V-funnel test</i> ”).....	43
4.2.4	Teor de ar.....	45
4.2.5	Massa volúmica no estado fresco	46
4.3	Características Mecânicas	47
4.3.1	Módulo de elasticidade secante em compressão	48
4.3.2	Comportamento em compressão	51
4.3.3	Comportamento em flexão	54
4.4	Ensaio de durabilidade.....	60
4.4.1	Absorção de água por imersão (pressão atmosférica).....	60
4.4.2	Absorção de água por capilaridade	64
4.4.3	Permeabilidade ao ar e à água	70
4.4.4	Resistividade Elétrica	78
4.4.5	Difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário.....	81
4.4.6	Resistência à penetração de cloretos por imersão	92
4.4.7	Carbonatação.....	98
CAPÍTULO 5 - CARACTERIZAÇÃO DA CORROSÃO DAS FIBRAS DE AÇO.....		103
5.1	Introdução.....	103
5.2	Noções básicas de Eletroquímica: Equilíbrio.....	103
5.2.1	Elétrodo, Potencial de Elétrodo e Potencial de Equilíbrio	103
5.2.2	Potencial de Corrosão.....	104
5.3	Noções básicas de Eletroquímica: Cinética.....	105
5.3.1	Curvas de polarização	105
5.4	Técnicas Experimentais de Monitorização Eletroquímica da Corrosão	107
5.4.1	Potencial em Circuito Aberto	107

5.4.2	Polarização Potenciodinâmica pelo método da extrapolação de Tafel.....	107
5.4.3	Polarização Linear	110
5.4.4	Materiais	111
5.4.5	Descrição dos Ensaios.....	112
5.4.6	Análise de Resultados	116
CAPÍTULO 6 - COMPORTAMENTO AO ARRANCAMENTO DE FIBRAS DE AÇO SUJEITAS À AÇÃO DA CORROSÃO		123
6.1	Introdução	123
6.2	Metodologia.....	123
6.2.1	Parâmetros em estudo	124
6.2.2	Produção dos Provetes	125
6.2.3	Execução da fissura.....	127
6.2.4	Imersão em Solução 3.5% NaCl	131
6.2.5	Monitorização Eletroquímica.....	132
6.2.6	Arrancamento da fibra	133
6.2.7	Análise de Resultados	135
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E INVESTIGAÇÃO FUTURA		139
7.1	Introdução	139
7.2	Conclusões Gerais.....	140
7.3	Sugestões para trabalho futuro.....	143
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		145
ANEXOS		151

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2 - ESTADO GERAL DO CONHECIMENTO

Figura 2.1 - Fibras de aço de extremidades dobradas.....	9
Figura 2.2 - Zona de transição interfacial (ZTI).....	10
Figura 2.3 - Representação esquemática de um ensaio de arrancamento (Ferreira, 2008).....	11
Figura 2.4 - Arrancamento de uma fibra de aço lisa e de uma fibra com extremidades dobradas (Força vs.deslizamento) (adaptado de Cunha <i>et al.</i> , 2007).....	12
Figura 2.5 - Corrosão superficial em BRFA (Balouch <i>et al.</i> , 2010).....	16
Figura 2.6 - Número de pontos de corrosão vs. período de exposição para diferentes razões A/C (W/C) (adaptado de Balouch <i>et al.</i> , 2010).....	17
Figura 2.7 - (a) - Detalhe da corrosão observada nas fibras na secção da fissura e (b) - Fotografia da fibra corroída (adaptado de Granju e Balouch, 2005).....	20
Figura 2.8 - Profundidade de penetração de cloretos na zona da fissura, d_T , em função da abertura de fissura, W_{cr} (Yoon, 2012).....	20
Figura 2.9 - Representação do comp. efetivo da fissura de acordo com o comp. crítico da fissura.....	20
Figura 2.10 - Abertura de fissura vs. espessura dos produtos de corrosão (t_{cor}) para uma espessura de recobrimento de 20 mm (adaptado de Solgaard <i>et al.</i> , 2010).....	22
Figura 2.11 - Abertura de fissura vs. espessura dos produtos de corrosão (t_{cor}) para uma espessura de recobrimento de 40 mm (adaptado de Solgaard <i>et al.</i> , 2010).....	22
Figura 2.12 - Efeito do teor de fibras na resistividade elétrica do BACRFA em função da idade do betão (adaptado de Tsai <i>et al.</i> , 2009).....	24

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E COMPOSIÇÕES

Figura 3.1 - Filer Calcário.....	29
Figura 3.2 - Agregados.....	30
Figura 3.3 - Curvas granulométricas dos agregados.....	30
Figura 3.4 - Fibras de aço RAD 65/35 HW da Radmix.....	32
Figura 3.5 - (a) Betoneira e (b) Materiais.....	35
Figura 3.6 - Mistura de agregados.....	36
Figura 3.7 - Introdução da água.....	36
Figura 3.8 - Introdução do filer calcário.....	37
Figura 3.9 - Introdução do cimento.....	37
Figura 3.10 - Produção de BAC.....	37
Figura 3.11 - Produção de BACRFA.....	37

Figura 3.12 - (a) Enchimento dos moldes e (b) provetes desmoldados	37
Figura 3.13 - Cura dos provetes em água à temperatura ambiente	38

CAPÍTULO 4 - CARACTERIZAÇÃO DO BAC E DO BACRFA

Figura 4.1 - Placa para o ensaio de espalhamento (unidades em mm).....	40
Figura 4.2 - Ensaio de espalhamento	40
Figura 4.3 - Dimensões geométricas da caixa L (unidades em mm)	42
Figura 4.4 - Ensaio da caixa L	42
Figura 4.5 - Geometria do Funil V	44
Figura 4.6 - Aerómetro para betão.....	45
Figura 4.7 - Configuração do ensaio para determinação do módulo de elasticidade	48
Figura 4.8 - Representação dos ciclos de carga/descarga para determinação do módulo de elasticidade	49
Figura 4.9 - Variação do módulo de elasticidade com a idade, do BAC e do BACRFA, obtida experimentalmente e do betão convencional prevista pelo Eurocódigo 2.....	50
Figura 4.10 - Bastidor de ensaios de compressão uniaxial utilizado nos ensaios de resistência à compressão dos provetes cilíndricos.....	51
Figura 4.11 - Relação média da tensão - extensão em compressão de quatro respostas obtidas do BAC e do BACRFA, aos 7, 28 e 90 dias de idade.....	52
Figura 4.12 - Variação da resistência à compressão com a idade, do BAC e do BACRFA, obtida experimentalmente e do betão convencional prevista pelo Eurocódigo 2	53
Figura 4.13 - Modos de rotura em compressão típicos dos provetes de BAC	53
Figura 4.14 - Modos de rotura em compressão típicos dos provetes de BACRFA.....	54
Figura 4.15 - Aplicação da carga e posicionamento dos transdutores	55
Figura 4.16 - Diagramas força vs. flecha (adaptado de Cunha, 2010, RILEM TC 162-TDF, 2002).....	55
Figura 4.17 - Diagrama força vs. CMOD (CEB-FIP MODEL CODE, 2010).....	56
Figura 4.18 - Relação força - flecha do BAC e BACRFA.....	57
Figura 4.19 - Relação força - flecha do BAC a diferentes idades.....	58
Figura 4.20 - Relação força - flecha do BACFRA a 7 dias.....	58
Figura 4.21 - Relação força - flecha do BACFRA a 28 dias.....	58
Figura 4.22 - Relação força - flecha do BACFRA a 90 dias.....	58
Figura 4.23 - Variação dos valores da resistência residual à tração por flexão com a idade para o BACRFA.....	59
Figura 4.24 - Recipiente onde se realizaram os ensaios de absorção de água por imersão.....	62
Figura 4.25 - Valores médios da absorção de água por imersão.....	63
Figura 4.26 - Comportamento capilar em função do tempo (Camões, 2002).....	65
Figura 4.27 - Qualidade do betão em função do coeficiente de absorção S (Coutinho, 1998)	65

Figura 4.28 - Recipiente onde se realizaram os ensaios de absorção de água por capilaridade.....	66
Figura 4.29 - Absorção capilar dos provetes de BAC	68
Figura 4.30 - Absorção capilar dos provetes de BACRFA.....	69
Figura 4.31 - Permeâmetro de Leeds.....	72
Figura 4.32 - Provetes utilizados	72
Figura 4.33 - Medição do fluxo que atravessa o provete.....	73
Figura 4.34 - Penetração da solução em provete de BAC	74
Figura 4.35 - Penetração da solução em provete de BACRFA.....	74
Figura 4.36 - Coeficiente de permeabilidade ao ar nos provetes de BAC e BACRFA	76
Figura 4.37 - Coeficiente de permeabilidade à água nos provetes de BAC e BACRFA.....	77
Figura 4.38 - Esquema de funcionamento do resistímetro de Wenner	79
Figura 4.39 - Esquema de leitura da resistividade elétrica nos provetes cilíndricos.....	80
Figura 4.40 - Preparação dos provetes de ensaio.....	83
Figura 4.41 - Preparação de provete para realização do ensaio em reservatório catódico.....	84
Figura 4.42 - Esquema do ensaio de difusão de cloretos (LNEC E463)	84
Figura 4.43 - Pormenor dos provetes para realização de leituras de penetração de cloretos	85
Figura 4.44 - Observação do aspeto límpido da solução catódica no ensaio com provetes de BAC.....	88
Figura 4.45 - Observação da formação de resíduos provenientes da corrosão das fibras de aço durante o ensaio com provetes de BACRFA	88
Figura 4.46 - Produtos de corrosão das fibras de aço visíveis no decorrer do ensaio de provetes de BACRFA... ..	88
Figura 4.47 - Corrosão superficial e macro-fissuração observada nos provetes ensaiados	89
Figura 4.48 - Configuração do ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral	90
Figura 4.49 - Provetes de BACRFA após ensaio de resistência à tração por compressão diametral, com e sem exposição à migração de cloretos	90
Figura 4.50 - Corrosão superficial dos provetes de BACRFA e corrosão das fibras de aço no comprimento de penetração dos cloretos.....	90
Figura 4.51 - Secção de fratura dos provetes de BACRFA	90
Figura 4.52 - Aspeto dos provetes impermeabilizados.....	93
Figura 4.53 - Imersão dos provetes	94
Figura 4.54 - <i>Kit</i> RCT-500 da Germann Instruments A/S.....	94
Figura 4.55 - Perfuração dos provetes	94
Figura 4.56 - <i>Kit</i> RCT-500: Calibradores de eléctrodo, frascos com líquido de extração, agente líquido do eléctrodo e o eléctrodo.....	95
Figura 4.57 - Medição do teor de cloretos.....	95
Figura 4.58 - Perfil de cloretos dos provetes de BAC	96

Figura 4.59 - Perfil de cloretos dos provetes de BACRFA.....	96
Figura 4.60 - Previsão de penetração de cloretos ao longo dos anos.....	98
Figura 4.61 - “Fatia” partida da viga para análise da profundidade de carbonatação.....	100
Figura 4.62 - Exposição da viga na câmara de carbonatação.....	100
Figura 4.63 - Evolução da profundidade de carbonatação no BACRFA com o tempo de exposição ao CO ₂	100
Figura 4.64 - Profundidade de carbonatação vs. tempo de exposição (294 dias).....	101
Figura 4.65 - Profundidade de carbonatação vs. tempo de exposição (70 dias).....	101

CAPÍTULO 5 - CARACTERIZAÇÃO DA CORROSÃO DAS FIBRAS DE AÇO

Figura 5.1 - Representação esquemática por meio de curvas de polarização da corrosão de um metal <i>Me</i> numa solução aquosa desaerada. E^* = potencial de corrosão; i^* = densidade de corrente de corrosão.....	104
Figura 5.2 - Curva de polarização (b) obtida num potencióstato para um caso de corrosão simples (a).....	106
Figura 5.3 - Curvas de polarização anódica (i_a) e catódica (i_c) num diagrama monologarítmico. E_e = Potencial de equilíbrio; i_0 = Densidade de corrente de troca.....	108
Figura 5.4 - Representação da curva de polarização potenciodinâmica com as inclinações anódicas e catódicas de Tafel.....	109
Figura 5.5 - Curva de polarização $\Delta E \times \Delta i$ mostrando a inclinação correspondente ao valor da resistência de polarização.....	110
Figura 5.6 - Fibra de aço de extremidades dobradas.....	111
Figura 5.7 - Célula eletroquímica para realização dos ensaios.....	113
Figura 5.8 - Potencióstato controlado pelo software VoltaMaster-4.....	113
Figura 5.9 - Pesagem das fibras.....	113
Figura 5.10 - Imersão da fibra na solução.....	113
Figura 5.11 - (a) Ensaio OCP e (b) (c) Ensaio de polarização potenciodinâmica.....	114
Figura 5.12 - Imersão das fibras de aço em solução de 3.5% NaCl durante 7 dias.....	114
Figuras 5.13 - (a) Imersão de 24 horas (b) Imersão de 48 horas.....	115
Figura 5.14 - Evolução do E_{OCP} na fibra ao longo de 1 hora de imersão - Série I.....	116
Figura 5.15 - Evolução do E_{OCP} na fibra ao longo de 7 dias de imersão – Série III.....	117
Figura 5.16 - Curvas de polarização potenciodinâmica nas fibras 1 – Série I e III.....	118
Figura 5.17 - Curvas de polarização linear nas fibras 2 – Série IV e V.....	119
Figura 5.18 - Microscópio eletrónico de varrimento.....	121
Figuras 5.19 - Micrografia MEV da superfície das fibras de aço (Ampliação 200×).....	121
Figura 5.20 - Micrografia MEV da superfície das fibras de aço (Ampliação 1000×).....	122

Figura 5.21 - Micrografia MEV da superfície das fibras de aço (Ampliação 5000×): 122

CAPÍTULO 6 - COMPORTAMENTO DE ARRANCAMENTO DE FIBRAS DE AÇO SUJEITAS À AÇÃO DA CORROSÃO

Figura 6.1 - Variáveis envolvidas no ensaio..... 125

Figura 6.2 - Aspeto do provete na 1ª e 2ª Fase 125

Figuras 6.3 - Estrutura auxiliar utilizada para posicionamento da fibra no provete de betão 126

Figuras 6.4 - Aspeto do provete (a) 1ª FASE (b) Aplicação da película (c) 2ª FASE 127

Figura 6.5 - Sistema de apoio dos provetes e fixação dos pantógrafos 128

Figura 6.6 - Peça 01 128

Figura 6.7 - Peça 02..... 128

Figura 6.8 - Peça 03..... 129

Figuras 6.9 - Aspeto das peças 04 129

Figuras 6.10 - Fixação dos comparadores mecânicos nos pantógrafos 130

Figuras 6.11 - Sistema de aplicação de força 130

Figuras 6.12 - Imersão dos provetes no Reservatório 1 131

Figura 6.13 - Reservatório 2 132

Figura 6.14 - Sistema de bombagem 132

Figura 6.15 - Rompimento da fibra de aço devido à ação da corrosão..... 132

Figura 6.16 - Célula eletroquímica para realização do ensaio OCP 133

Figura 6.17 - Configuração do ensaio de arrancamento de fibras de aço 133

Figura 6.18 - Ensaios de arrancamento de fibras de aço 134

Figura 6.19 - Aspeto das fibras após ensaio de arrancamento 135

Figura 6.20 - Evolução do potencial em circuito aberto da fibra ao longo do período de imersão e em função da abertura de fissura do provete..... 135

Figuras 6.21 - Relação Força de arrancamento (média, mínimo e máximo) versus Deslizamento das fibras para as distintas aberturas de fissura 136

Figura 6.22 - Relação Força de arrancamento versus Deslizamento das fibras para as distintas aberturas de fissura 137

Figura 6.23 - Efeito de “*snubbing*” observado no arrancamento das fibras (Døssland, 2008). 138

ÍNDICE DE QUADROS

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E COMPOSIÇÕES

Quadro 3.1 - Características químicas do cimento	27
Quadro 3.2 - Características mecânicas do cimento	27
Quadro 3.3 - Características físicas do cimento	28
Quadro 3.4 - Composição química do cimento	28
Quadro 3.5 - Composição potencial do cimento	28
Quadro 3.6 - Características físicas do filer calcário	29
Quadro 3.7 - Características químicas do filer calcário	29
Quadro 3.8 - Análise granulométrica dos agregados	31
Quadro 3.9 - Características do ViscoCrete 3005 da Sika	32
Quadro 3.10 - Composições do BAC e do BACRFA por m ³	33
Quadro 3.11 - Provetes moldados para os ensaios de caracterização mecânica e de avaliação da durabilidade (BAC e BACRFA)	34

CAPÍTULO 4 - CARACTERIZAÇÃO DO BAC E DO BACRFA

Quadro 4.1 - Resultados dos ensaios de espalhamento	41
Quadro 4.2 - Valores médios de dois ensaios da caixa L	43
Quadro 4.3 - Valores médios de dois ensaios de fluidez	44
Quadro 4.4 - Valores médios de dois ensaios de determinação do teor de ar	46
Quadro 4.5 - Valores médios de dois ensaios de determinação da massa volúmica	47
Quadro 4.6 - Valores médios de quatro ensaios de determinação do módulo de elasticidade	50
Quadro 4.7 - Resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão	52
Quadro 4.8 - Resistências equivalentes e residuais de acordo com a RILEM para o BACRFA	58
Quadro 4.9 - Resistências residuais de acordo com o CEB-FIP para o BACRFA	59
Quadro 4.10 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão	62
Quadro 4.11 - Massas volúmicas das partículas secas, impermeáveis e sólidas saturadas	64
Quadro 4.12 - Resultados obtidos de A_c (mg/mm ²) no BAC	68
Quadro 4.13 - Resultados obtidos de A_c (mg/mm ²) no BACRFA	69
Quadro 4.14 - Resultados da porosidade aberta	75
Quadro 4.15 - Coeficiente de permeabilidade ao ar no BAC	75
Quadro 4.16 - Coeficiente de permeabilidade ao ar no BACRFA	76
Quadro 4.17 - Coeficiente de permeabilidade à água no BAC	77

Quadro 4.18 - Coeficiente de permeabilidade à água no BACRFA	77
Quadro 4.19 - Risco de corrosão associado à resistividade elétrica.....	80
Quadro 4.20 - Resistividade elétrica média dos provetes de BAC e de BACRFA	81
Quadro 4.21 - Tabela com tensão de teste e duração de ensaio (Nordic Council of Ministers)	85
Quadro 4.22 - Características dos provetes de BAC.....	86
Quadro 4.23 - Características dos provetes de BACRFA	87
Quadro 4.24 - Coeficiente de difusão de cloretos no BAC.....	87
Quadro 4.25 - Coeficiente de difusão de cloretos no BACRFA	87
Quadro 4.26 - Resultados de f_{ct} em provetes submetidos a 30 V durante 72 horas	91
Quadro 4.27 - Resultados de f_{ct} em provetes submetidos a 45 V durante 72 horas	91
Quadro 4.28 - Resultados de f_{ct} em provetes sem ação da corrosão	91
Quadro 4.29 - Perfis de cloretos dos provetes de BAC e BACRFA.....	96
Quadro 4.30 - Resultados de D e de K dos provetes de BAC e BACRFA	97
Quadro 4.31 - Profundidade de carbonatação média ao longo do período de exposição.....	101

CAPÍTULO 5 - CARACTERIZAÇÃO DA CORROSÃO DAS FIBRAS DE AÇO

Quadro 5.1 - Programa de ensaios realizados	112
Quadro 5.2 - Resultados obtidos nos ensaios de polarização potenciodinâmica da série I e III	118
Quadro 5.3 - Resultados obtidos nos ensaios de polarização linear da série IV e V.....	119
Quadro 5.4 - Perda de massa da fibra durante os ensaios (%)	120

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 Introdução

A durabilidade das estruturas de betão tem sido uma preocupação constante no meio técnico da construção, devido ao número crescente de estruturas degradadas prematuramente. Estas devem possuir capacidade de resistência às solicitações provenientes das ações mecânicas, assim como, às solicitações derivadas das agressividades físicas, químicas e biológicas a que estão expostas durante a sua vida útil (Álvarez, 2009).

O betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA) combina os benefícios da trabalhabilidade do betão auto-compactável com o aumento da ductilidade consequente da adição de fibras de aço a materiais de matriz cimentícia. Esta combinação origina uma melhoria das características mecânicas do betão, nomeadamente, um aumento da resistência residual e uma maior capacidade de absorção e dissipação de energia, após o início da fendilhação da matriz.

Para os betões convencionais, sem adição de fibras de aço, existem indicadores de durabilidade que são de utilização corrente (Camões e Costeira, 2012). No entanto, para betões reforçados com fibras de aço, a bibliografia ainda é escassa e os assuntos relacionados com a durabilidade, nomeadamente com a resistência à corrosão das fibras de aço, estão tratados de uma forma ainda incipiente, suscitando a dúvida se a corrosão das fibras pode, ou não, provocar o destacamento do betão envolvente (Camões e Costeira, 2012 e Solgaard *et al.*, 2010).

Quando as fibras de aço são adicionadas ao betão, a possibilidade de corrosão das fibras é um parâmetro de durabilidade que requer especial atenção. A corrosão é uma das manifestações patológicas que mais degrada as estruturas de betão armado, pelo que, é de todo o interesse analisar os efeitos deste fenómeno no BACRFA. Deste modo, torna-se necessário avaliar as propriedades de transporte de agentes agressivos para o interior das estruturas de BACRFA,

que a longo prazo possam, eventualmente, afetar a sua durabilidade (Camões e Costeira, 2012, Granju e Balouch, 2005, Yoon, 2012, Norsdtrom, 2005, Balouch *et al.*, 2010, Corinaldesi e Moriconi, 2004, Rapoport *et al.*, 2002 e Graeff *et al.*, 2009).

No betão fendilhado, a corrosão tende a ocorrer nas fibras de aço que atravessam as fissuras, provocando a redução da secção das fibras. Esta redução pode afetar negativamente o comportamento mecânico do betão reforçado com fibras de aço (BRFA), podendo conduzir a uma significativa redução da resistência residual do BRFA em tração e flexão. Por outro lado, os produtos corrosivos podem causar um aumento do atrito fibra/matriz, melhorando o comportamento de arrancamento da fibra e, conseqüentemente, a resistência à flexão dos elementos de BRFA (Granju e Balouch, 2005). Deste modo, o estudo deste comportamento interfacial fibra/matriz é importante para a compreensão dos efeitos da corrosão das fibras de aço no comportamento mecânico e na durabilidade das estruturas de BACRFA.

A presente dissertação pretende dar um contributo na avaliação da durabilidade das estruturas de BACRFA, através do estudo do comportamento do BACRFA face à ação da corrosão, por intermédio da realização de ensaios de arrancamento de fibras de aço em betão fendilhado sujeitas à ação da corrosão, conseguida pela exposição a ambientes agressivos, nomeadamente contendo cloretos. Nesta dissertação, recorrendo à realização de ensaios de arrancamento de fibras pretende-se obter a relação tensão/deslizamento tendo em conta o dano introduzido devido à corrosão da fibra.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito de um projeto de investigação, em curso na Universidade do Minho, denominado LEGOUSE - Pré-fabricação Modular de Edifícios de Custos Controlados. Pretende-se com esta dissertação, contribuir para o desempenho ótimo do painel sandwich pré-fabricado (desenvolvido no âmbito do projeto LEGOUSE), constituído por camadas externas em BACRFA, ligadas por material leve e de baixo custo (conectores de GFRP - *Glass Fiber Reinforced Polymer*), resultando num painel com propriedades estruturais e de isolamento térmico e acústico apropriadas para ser utilizado em construções modulares. A rapidez de construção e o custo dos elementos construtivos torna estas habitações competitivas face às soluções tradicionais. Este conceito de painel sandwich é especialmente vocacionado para países com carência habitacional, como é o caso dos PALOP, pretendendo-se alargar a sua aplicação a outros países do Continente Africano, à

Índia e a países da América Latina, onde a falta de habitação condigna contribui para o flagelo da imigração clandestina.

1.2 Objetivos

O objetivo geral desta dissertação consiste, ao nível do material, avaliar se os ensaios correntes de determinação de indicadores de durabilidade para betão convencional são aplicáveis ao BACRFA. A caracterização da resistência à corrosão das fibras de aço no BACRFA fendilhado, sob diferente estado de tensão de tração e em condições de exposição ambiental agressivas, nomeadamente, contendo cloretos, é também objetivo do presente trabalho. Ao nível estrutural, pretende-se quantificar a influência da corrosão das fibras de aço no desempenho mecânico pós - fendilhação de estruturas de BACRFA.

Os objetivos específicos são:

- (1) Avaliação do desempenho de durabilidade potencial do BACRFA através de ensaios de avaliação do comportamento mecânico e de ensaios indicadores de durabilidade;
- (2) Avaliação da resistência à corrosão de fibras de aço através de técnicas eletroquímicas de determinação do potencial e velocidade de corrosão;
- (3) Avaliação da influência da abertura de fissura na resistência à corrosão das fibras, para um determinado estado de tensão e uma exposição de agressividade ambiental contendo cloretos;
- (4) Avaliação da influência da corrosão na condição de ligação existente entre a fibra de aço e a matriz cimentícia, através da determinação da relação tensão-deslizamento obtida em ensaios de arranque com provetes de BACRFA fissurados e expostos a ambiente agressivo contendo cloretos. Com estes ensaios também se pretende determinar a influência da corrosão das fibras na relação tensão-abertura de fissura, na evolução da abertura de fissura ao longo do tempo de exposição em ambiente salino e nos parâmetros que caracterizam o comportamento pós-fendilhação do BACRFA.

1.3 Estrutura da dissertação

A investigação realizada, conducente à concretização dos objetivos propostos, encontra-se descrita no presente trabalho, o qual é composto pelos seguintes sete capítulos:

Capítulo 1 - *Introdução e Objetivos* - Introduz o tema da durabilidade do BACRFA, identifica os objetivos e resume a estrutura da dissertação.

Capítulo 2 - *Estado Geral do Conhecimento* - Sintetiza o estado atual do conhecimento técnico e científico sobre a durabilidade dos betões contendo fibras de aço, em particular, sobre os efeitos da corrosão das fibras nas principais propriedades do BRFA.

Capítulo 3 - *Materiais e Composições* - Descreve os materiais utilizados e as composições de BAC e de BACRFA adotadas no programa experimental. Com o intuito de analisar e comparar resultados na avaliação do comportamento mecânico e dos indicadores de durabilidade do BACRFA, foram produzidos, em igual número, provetes de BACRFA e de BAC sem fibras (matriz cimentícia de referência).

Capítulo 4 - *Caracterização do BAC e do BACRFA* - Apresenta o programa experimental de caracterização das propriedades do BAC e do BACRFA no estado fresco (espalhamento, caixa L, fluidez, volume de vazios e massa volúmica), do comportamento mecânico (módulo de elasticidade, resistência à compressão e à flexão, com especial ênfase no comportamento pós-fendilhação em flexão) e dos indicadores de durabilidade (absorção de água por imersão e por capilaridade, permeabilidade ao ar e à água, resistividade elétrica, difusão de cloretos por migração em regime não estacionário, resistência à penetração de cloretos por imersão e carbonatação).

Capítulo 5 - *Caracterização da corrosão das fibras de aço* - Apresenta o programa experimental de caracterização da corrosão das fibras de aço, por intermédio de técnicas de monitorização eletroquímica da corrosão (potencial em circuito aberto, polarização potenciodinâmica e polarização linear).

Capítulo 6 - *Comportamento ao arrancamento de fibras de aço sujeitas à ação da corrosão* - Apresenta a metodologia desenvolvida e os resultados obtidos dos ensaios de arrancamento de fibras de aço sujeitas à ação da corrosão em provetes de BACRFA fissurados, em função da abertura de fissura e para um determinado estado de tensão.

Capítulo 7 - *Conclusões e Investigação Futura* - Resume as conclusões sustentadas nos resultados apresentados ao longo da dissertação e sugere futuros desenvolvimentos no âmbito do estudo da durabilidade, nomeadamente, da resistência à corrosão do BRFA/BACRFA.

Os programas experimentais desenvolvidos neste trabalho, foram realizados nos seguintes laboratórios, localizados na Escola de Engenharia da Universidade do Minho, em Azurém, Guimarães:

- Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil (LMC);
- Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil (LEST);
- Laboratório de Ensaio de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica;

A produção dos betões em estudo e os ensaios de flexão foram realizados na empresa CiviTest – Pesquisa de Novos Materiais para a Engenharia Civil, Lda., localizada em Vila Nova de Famalicão.

CAPÍTULO 2

ESTADO GERAL DO CONHECIMENTO

2.1 Introdução

O presente capítulo aborda sintetizadamente, o estado atual do conhecimento técnico e científico sobre a durabilidade dos betões reforçados com fibras de aço (BRFA), em particular sobre os efeitos da corrosão das fibras no comportamento pré- e pós-fendilhação do BRFA.

2.2 Betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA)

O betão auto-compactável reforçado com fibras de aço (BACRFA) é um material que alia as vantagens inerentes à utilização de um betão reforçado com fibras de aço (BRFA) com as que resultam do facto de se tratar de um betão auto-compactável (BAC), nomeadamente, a elevada capacidade de fluir, contornar obstáculos e preencher zonas de difícil acesso, sem ocorrência de segregação dos seus constituintes, sendo a sua consolidação garantida, unicamente, pela ação do seu peso próprio, sem necessidade de vibração (Gomes, 2010).

Uma das principais razões da adição de fibras ao betão é a possibilidade de substituir, de forma total ou parcial, a armadura convencional em determinados elementos de betão, proporcionando vantagens técnicas e económicas. Em termos de vantagens técnicas, a adição de fibras de aço proporciona melhoria das propriedades mecânicas do betão, nomeadamente, a resistência residual pós-fissuração e a capacidade de absorção de energia (Barros, 1996). Um aumento da durabilidade do betão também é verificado com a adição de fibras de aço, garantindo um maior controlo da fendilhação por retração e uma menor propensão a danos por corrosão dos elementos de reforço. As vantagens económicas são, essencialmente, a supressão de mão-de-obra necessária para a preparação e montagem das armaduras convencionais, com a consequente redução dos prazos de execução da estrutura.

A adição de fibras de aço no BAC traz a vantagem de se obter uma dispersão mais homogénea do reforço, o que confere às estruturas compostas por este material uma maior fiabilidade (Gomes, 2010). Devido à maior compacidade do BAC, traduzida pelo aumento de

partículas finas, é possível melhorar a zona de interface entre as fibras e os restantes componentes do betão (Ferrara *et al.*, 2007).

O comportamento do betão reforçado com fibras de aço depende dos materiais constituintes e do processo de fabrico, das propriedades mecânicas e das características geométricas das fibras utilizadas.

2.2.1 Fibras de aço

No âmbito da tecnologia do betão reforçado com fibras (BRF), as fibras de aço são as mais utilizadas, dada a sua resistência à agressividade do meio ambiente, ao grau de reforço que proporcionam e ao seu preço (Balaguru e Shah, 1992). Definidas como curtas, possuem comprimentos discretos e a esbelteza está compreendida entre 20 e 100, para qualquer uma das secções transversais (diâmetro varia entre 0.25 a 1.00 mm). São suficientemente pequenas, para serem dispersas aleatoriamente na amassadura de betão fresco, realizada de acordo com os procedimentos convencionais (ACI 544.1R-96, 1997). É recomendada a utilização de fibras, cujo comprimento seja igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado utilizado no betão (Figueiredo, 2000).

Quanto à geometria, as fibras podem ter diversas formas, por exemplo, podem ser lisas (*smooth*), onduladas ou com extremidades dobradas (*hooked end*). Estes dois últimos tipos de fibras garantem maior grau de ligação da fibra ao betão, sendo necessário dissipar mais energia para arrancar a fibra de um meio de matriz cimentícia (Cunha *et al.*, 2008).

A relação entre o comprimento da fibra e o seu diâmetro define o que se designa por fator de forma da fibra, variando geralmente entre 20 e 100 (ACI 544.1R-96,1997). Se a homogeneidade na distribuição das fibras for assegurada, quanto maior for este fator, maior serão os benefícios que as fibras proporcionam. No entanto, a trabalhabilidade da mistura e a homogeneidade na distribuição das fibras diminuem com o aumento do fator de forma. Foram lançadas no mercado, fibras de fator de forma elevado, coladas entre si, constituindo plaquetas de 30 a 50 fibras (Figura 2.1). Durante a amassadura, a cola que une estas fibras dissolve-se na água, sendo recuperado o fator de forma das fibras individuais e, por conseguinte, é assegurada a distribuição homogénea e a total capacidade de reforço que as fibras individuais concedem (Barros, 2000).

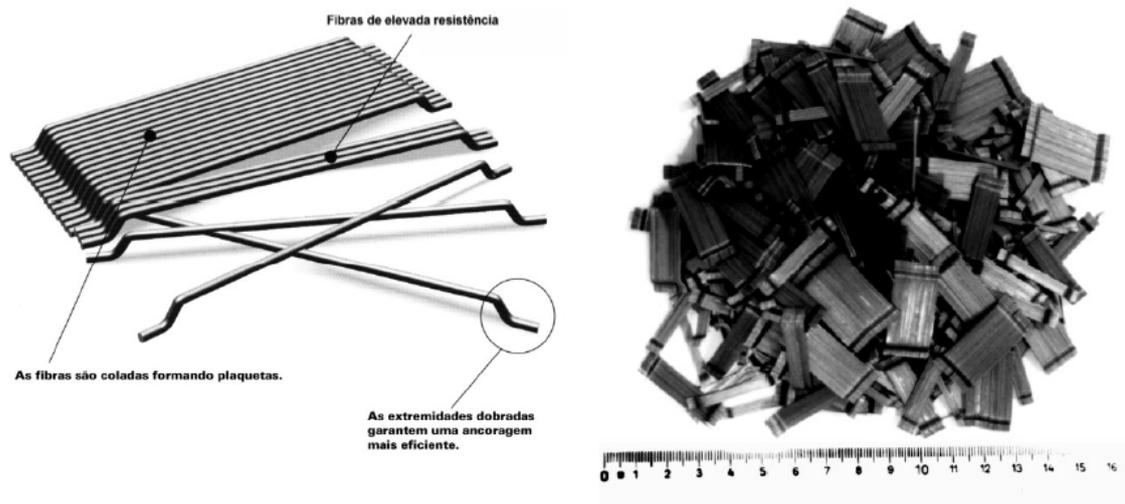


Figura 2.1 - Fibras de aço de extremidades dobradas

As fibras de aço de extremidades dobradas são fabricadas a partir de fios de aço trefilados que garantem resistência à tração superior a 1000 MPa.

Relativamente à quantidade de fibras de aço adicionadas na mistura de betão, de modo a não provocar uma diminuição da trabalhabilidade do betão, a sua dosagem não deve exceder os 3% do volume da composição (Barros, 1996).

A resistência do BRFA é elevada porque as fibras possuem um módulo de elasticidade (200GPa) superior ao da matriz cimentícia (15-40 GPa), o que dificulta a propagação das fissuras. Pela capacidade portante pós-fissuração que o composto apresenta, estas fibras permitem uma redistribuição de esforços no material, mesmo quando utilizadas em baixos teores (Figueiredo, 2000).

A maioria da metodologia convencional de fabrico dos betões simples, sem qualquer tipo de reforço, é aplicável aos betões reforçados com fibras de aço, com pequenas adaptações. Para que as fibras sejam eficazes em termos de reforço, é necessário que se impeça a sua aglomeração durante o processo de amassadura da mistura. O aumento da esbelteza e da percentagem de fibras, do tamanho e da quantidade de agregados graúdos intensifica a tendência para a aglomeração de fibras, diminuindo a trabalhabilidade da mistura. No BRFA aplica-se um pouco mais de material ligante e de agregados finos comparativamente com o betão simples (ACI 544.1R-96, 1997). É normal utilizar-se também adições minerais como

pozolanas, escórias, cinzas volantes e adjuvantes plastificantes redutores de água, dado que permitem diminuir a percentagem de água e, conseqüentemente, aumentar a resistência do compósito, sem prejuízo da trabalhabilidade da mistura (ACI 544.1R-96, 1997).

2.2.2 Interface fibra / matriz

Ao introduzir fibras de aço no betão fresco ocorre uma perturbação na distribuição dos agregados grossos e das areias, verificando-se uma maior concentração de pasta de cimento em redor das fibras de modo a preencher os espaços criados (efeito de parede) (Dupont, 2003). A zona de transição na vizinhança do reforço é então dependente de vários parâmetros, entre eles, da natureza do ligante, da presença de adições, da razão A/C, do tipo de fibra e do modo e tempo de amassadura (Cunha *et al.*, 2007 e Bentur e Mindess, 2007).

Em redor de certas heterogeneidades, como as fibras de aço, surge a denominada zona de transição interfacial (ZTI), substancialmente diferente em comportamento e composição da matriz mais interior. Assim a formação da ZTI é consequência do efeito de parede, da possibilidade de ocorrência de reações químicas junto à superfície da não homogeneidade, e da exsudação e aprisionamento de água como resultado do deficiente agrupamento dos grãos de cimento (~10 µm) na zona 20-50 µm em torno da fibra (Bentur e Mindess, 2007; Löfgren, 2005, Ferreira, 2008). Foi estimado que a largura da ZTI num betão típico se situa no intervalo 20~50 µm, perfazendo um total entre os 20~40 % do volume total da matriz cimentícia (Löfgren, 2005). Na Figura 2.2 apresenta-se duas imagens dessa zona de transição interfacial.

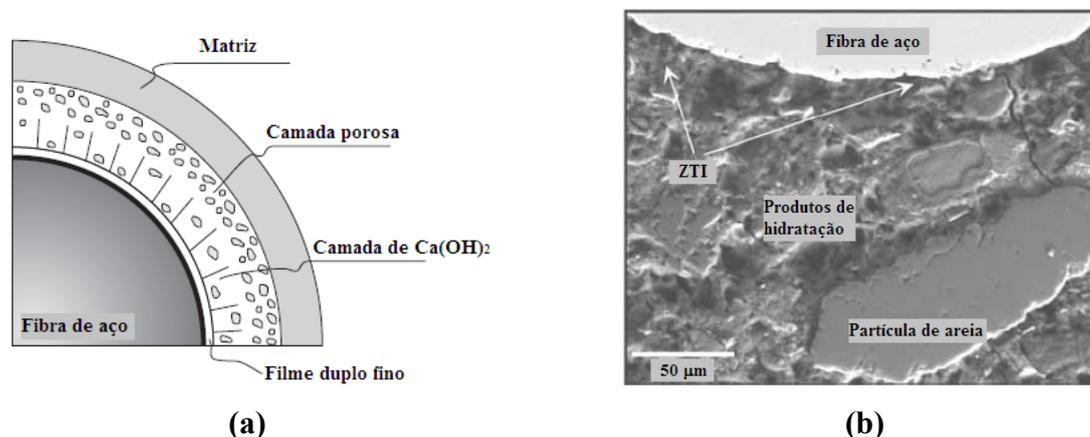


Figura 2.2 - Zona de transição interfacial (ZTI): **(a)** - Esquema da ZTI em torno da fibra (adaptado de Bentur e Mindess, 2007); **(b)** - Observação microscópica da ZTI próxima da fibra e a microestrutura do betão (T. Easley e K.T. Faber, Northwestern University (Löfgren, 2005))

A ZTI no BACRFA apresenta-se um pouco diferente da dos betões convencionais, visto que no BAC a baixa relação água/finos e a diminuição da máxima dimensão de agregado, bem como da relação agregado grosso/agregado fino, modificam a ligação entre as fibras e a matriz (Cunha *et al.*, 2008).

O estudo da microestrutura da ZTI entre a fibra e a matriz cimentícia, assume elevada importância na caracterização do desempenho do BACRFA, visto que quanto maior a aderência entre o betão e as fibras, melhor o comportamento mecânico e a durabilidade do betão (Gomes, 2010). Para avaliar as propriedades da interface fibra/matriz, recorre-se a ensaios de arrancamento de fibras (*fiber pullout test*) e a observações em microscópio eletrónico de varrimento (MEV) da superfície das fibras arrancadas das matrizes cimentícias.

Os ensaios de arrancamento de uma fibra, onde a força necessária para arrancar uma fibra embebida no BAC é monitorizada em controlo de deformação (registando os valores de força vs. deslocamento), fornecem uma informação útil relativamente ao comportamento após a abertura de uma fenda, dando, portanto, a informação da capacidade de transferência de energia para a fibra quando se abre uma fenda (Gomes, 2010). Trata-se de um processo de desligamento gradual da interface em torno da fibra seguida por um escorregamento e arrancamento desta (força vs. deslizamento) (Ferreira, 2008). As fibras que cruzam a fenda evitam que esta se propague rapidamente oferecendo um comportamento dúctil (Gomes, 2010). Na Figura 2.3 apresenta-se uma representação esquemática de um ensaio de arrancamento.

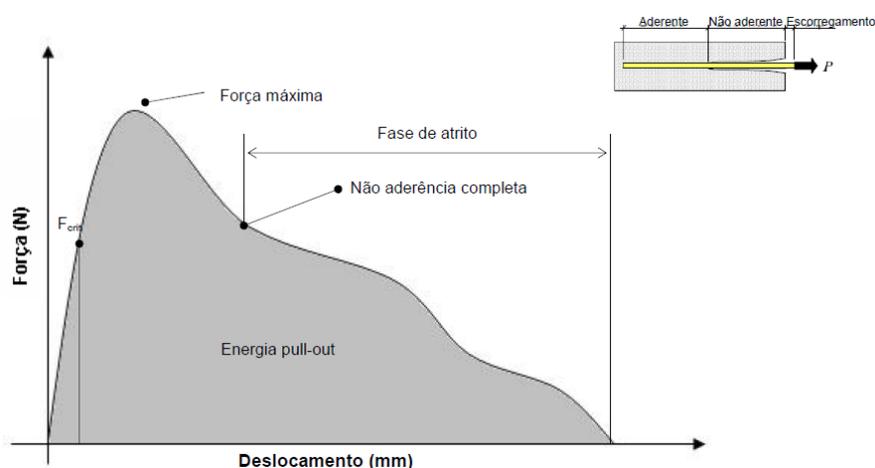


Figura 2.3 - Representação esquemática de um ensaio de arrancamento (Ferreira, 2008)

A utilização de fibras de aço com extremidades dobradas em alternativa às fibras lisas possui vantagens em termos de comportamento ao arrancamento, visto que as extremidades dobradas das fibras conferem atrito, promovendo uma ancoragem maior ao BAC e, conseqüentemente, um aumento da força de arrancamento. Na Figura 2.4 encontra-se representado o comportamento de arrancamento de uma fibra lisa (*smooth fiber*) e de uma fibra com as extremidades dobradas (*hooked end fiber*).

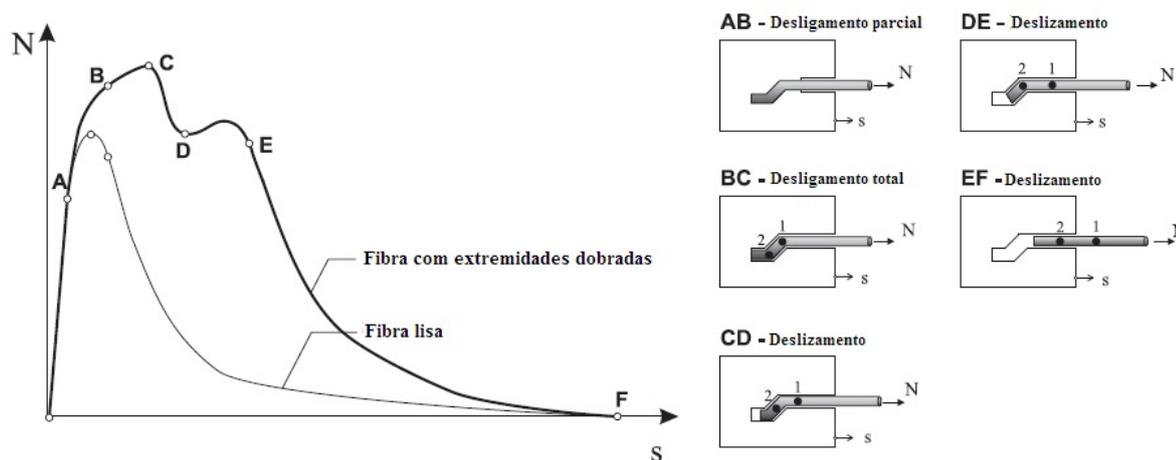


Figura 2.4 - Arrancamento de uma fibra de aço lisa e de uma fibra com extremidades dobradas (Força vs. deslizamento) (adaptado de Cunha *et al.*, 2007)

Na Figura 2.4 o comportamento pré-pico da fibra com as extremidades dobradas, pode ser descrito por 3 fases, OA, AB e BC, associados a distintos fenómenos. No patamar linear OA verifica-se o comportamento elástico da ligação de aderência da fibra ao betão e no patamar AB ilustra-se o processo de desligamento da fibra, que ocorre na sua totalidade no ponto B. Após este desligamento, ocorre um aumento da força de arrancamento (patamar BC), não verificado no caso das fibras lisas, que é devido à ancoragem proveniente da extremidade dobrada da fibra. Após ser atingida a força máxima de arrancamento (ponto C), a ancoragem começa a se deformar, progressivamente, e a força de arrancamento começa a diminuir devido ao escorregamento da fibra (patamar CD). No caso do arrancamento das fibras de extremidades dobradas, existe ainda outro patamar de pico (DE) correspondente à passagem da fibra na última curva que deixou impressa na matriz do betão. No arrancamento destas fibras é frequente a extremidade dobrada endireitar, seguindo-se o patamar EF, correspondente ao processo de arrancamento final sob resistência ao atrito, conforme acontece no caso das fibras lisas. No entanto, por vezes, as extremidades das fibras não endireitam na

sua totalidade, aumentando a força de atrito que resulta numa força de arrancamento residual elevada no último patamar do arrancamento (Cunha *et al.*, 2007).

2.3 Durabilidade do betão reforçado com fibras de aço

Os principais agentes agressivos que mais afetam a durabilidade das estruturas de BRFA são a ação da carbonatação (mais evidente nos grandes centros urbanos), a ação dos iões cloreto (que afeta principalmente as estruturas em zonas costeiras), a ação dos sulfatos, a ação do gelo-degelo e a ação do fogo.

Teruzzi *et al.* (2004) afirmaram que a adição de fibras de aço não proporciona uma diferença significativa e negativa na durabilidade do betão. Na sua investigação, comprovaram que a zona de transição interfacial em torno das fibras não fornece um caminho preferencial para a entrada de gases ou líquidos e, portanto, não afeta a resistência à carbonatação, à penetração dos iões cloreto ou à permeabilidade ao oxigénio. Por outro lado, um estudo recente desenvolvido por Rahmani *et al.* (2011) sobre o betão reforçado com fibras de aço, indica que a penetração de água e a permeabilidade ao gás aumenta no BRFA, em relação ao betão sem fibras. Costeira (2011) realizou ensaios de avaliação da durabilidade do BRFA, nomeadamente, ensaios de absorção de água por imersão e por capilaridade, profundidade de penetração de água sob pressão, migração acelerada de iões cloreto e resistividade, e concluiu que a presença de fibras de aço na amassadura do betão aumenta a porosidade aberta e a permeabilidade dos betões, para além de aumentar a probabilidade de ocorrência de fenómenos de corrosão no interior da matriz. Estes resultados podem ser explicados pelo facto de as fibras de aço terem tendência para aumentar o número de vazios na matriz.

2.3.1 Permeabilidade e Porosidade

A permeabilidade afeta a durabilidade e a integridade do BRFA. A elevada permeabilidade associada à porosidade, permite a entrada de água (principal meio de transporte de agentes agressivos), cloretos e outros agentes agressivos que afetam as fibras, podendo mesmo comprometer a capacidade resistente das estruturas (Rapoport *et al.*, 2002 e Costeira, 2011).

O principal fator a nível da permeabilidade que pode diferenciar o BRFA do betão convencional é a presença e quantidade de fibras. Teoricamente, quanto maior o teor de fibras num BRFA, maior será a sua porosidade, devido ao maior número de índice de vazios.

Contudo, durante a fase de utilização das estruturas, o betão encontra-se fendilhado e a fendilhação no BRFA é mais reduzida porque as fibras restringem a abertura de fissuras.

Rapoport *et al.* (2002) realizaram ensaios de compressão diametral, para induzir fissuração de 500 μm em amostras de BSF (betão sem fibras) e de BRFA, com um volume de fibras de 0.5% e 1%. Os resultados permitiram concluir que em relação ao BSF, as fibras de aço diminuem a permeabilidade das amostras fissuradas de BRFA, com uma abertura de fissura maior que 100 μm . Para aberturas de fissura menores que 100 μm , a adição de fibras de aço não influencia a permeabilidade do betão. O volume de fibras de 1% diminuiu mais a permeabilidade do BRFA, do que o volume de 0.5%, sendo que com 0.5% de volume de fibras, a permeabilidade é inferior à do BSF (Rapoport *et al.*, 2002).

Numa situação em que não haja fissuras, a permeabilidade do BRFA, com razão A/C inferior a 0.45, é quase insignificante (Costeira, 2011).

O betão tradicional vibrado poderá apresentar diferentes níveis de permeabilidade, no caso da compactação por vibração não ser realizada corretamente, de uma forma homogénea (Gomes, 2010). Pelo contrário, o BAC ultrapassa estas dificuldades, uma vez que a sua permeabilidade é potencialmente mais uniforme, oferecendo menos pontos frágeis de entrada a agentes nocivos (European Guidelines for Self Compacting Concrete, 2005). Por outro lado, o BAC apresenta em geral, uma baixa relação água-ligante o que reduz a permeabilidade do betão (Gomes, 2010).

2.3.2 Carbonatação e ação dos iões Cloreto - Efeitos da Corrosão

Os processos de corrosão das fibras de aço têm sido objeto de estudo nos últimos anos, sendo opinião geral que a corrosão no BRFA é menos gravosa quando comparada com a corrosão das armaduras ordinárias do betão armado (Balouch *et al.*, 2010). Este facto verifica-se dado que a diminuição do diâmetro das fibras por corrosão não diminui significativamente a capacidade resistente da interface fibra-matriz, e consequentemente, o comportamento mecânico e a durabilidade das estruturas de BRFA.

Waweru (2011) investigou o efeito da corrosão das fibras na resistência ao corte de vigas de BRFA, usando fibras pré-corroídas. Os resultados que obteve mostraram que a redução de

12.5% do diâmetro das fibras, quase que não afetou a resistência ao corte das vigas. No entanto, nas fibras com redução de 50% do diâmetro, observou-se uma redução de 24% da resistência ao corte das vigas. Nos ensaios de arrancamento que realizou, verificou até um ligeiro aumento da força de arrancamento das fibras, o que significa haver um aumento da rugosidade, da superfície de contacto e da integração das fibras pré-corroídas na matriz (Waweru, 2011).

As principais causas da corrosão das fibras de aço no BRFA são a penetração de cloretos e a redução do pH da matriz cimentícia causada pela carbonatação (ACI 544.5R-10, 2010).

A carbonatação depende da permeabilidade do betão e diminui com o tempo de exposição. A penetração do CO₂ inicia-se na superfície do betão, continua enquanto houver CO₂ disponível e interrompe quando a frente de carbonatação atinge o hidróxido de cálcio envolvente das fibras. Quando as fibras perdem esta camada de passivação protetora, o processo de corrosão inicia-se, mantendo-se livres de corrosão as fibras localizadas em maior profundidade.

Corinaldesi e Moriconi (2004) mediram a profundidade de penetração do CO₂ pelo teste da fenolftaleína (RILEM TC 56-MHM, 1988) em provetes cúbicos de BRFA (100 mm) expostos ao ar à temperatura de 20°C, um dia após terem sido desmoldados. Após 6 meses de exposição, a carbonatação causou corrosão superficial mas não evidenciou indícios de causar destacamento do betão envolvente (Corinaldesi e Moriconi, 2004).

A penetração dos cloretos depende da estrutura porosa do betão e de todos os fatores relacionados com a composição do betão (a razão A/C, tipo e quantidade de adições minerais e cimento, a cura, etc.) e com a presença de fissuras (Shi *et al.*, 2012). Em função das condições de agressividade ambiental, a penetração de cloretos pode ocorrer através de diversos mecanismos de transporte, tais como, permeação, absorção capilar, migração e difusão (Costeira, 2011).

A durabilidade das fibras de aço está condicionada pelo seu confinamento num meio fortemente alcalino como o do betão (pH superior a 12.5), onde estas permanecem passivadas (Mangat e Gurusamy, 1987). No entanto, a menor abertura de fissura, associada à descontinuidade das fibras (que não permite a formação de grandes ligações ânodo-cátodo), faz com que estas estejam menos suscetíveis aos agentes corrosivos do que as armaduras

convencionais, sendo que a razão A/C é o principal fator que pode fazer variar a corrosão superficial (Balouch *et al.*, 2010).

2.2.2.1 Corrosão Superficial

A interação entre a camada superficial do betão com o meio ambiente é essencial para o início de diversos processos de degradação e, no BRFA, algumas fibras apresentam-se muitas vezes à superfície, sem camada de recobrimento exterior protetor, podendo sofrer processos de corrosão (Figura 2.5).



Figura 2.5 - Corrosão superficial em BRFA (Balouch *et al.*, 2010)

A corrosão superficial afeta negativamente a aparência das superfícies de betão, com o aparecimento de manchas de ferrugem, no entanto, não afeta as propriedades mecânicas do betão (Graeff *et al.*, 2009). O nível de corrosão depende do meio ambiente em que a estrutura de BRFA está inserida.

Granju e Balouch (2005) estudaram a corrosão do BRFA por penetração de cloretos na superfície do betão. No estudo que realizaram, observaram que, numa matriz cimentícia de elevada porosidade (razão A/C =0.60), apesar de os cloretos penetrarem alguns milímetros no interior do betão, apenas as fibras localizadas numa espessura exterior inferior a 1 mm, estavam corroídas. O mesmo estudo revelou também que, quando a razão A/C é menor ou igual a 0.5, o mínimo recobrimento superficial, para evitar a corrosão das fibras, é de 0.1 mm (Granju e Balouch, 2005).

Balouch *et al.* (2010) realizaram duas séries de ensaios para determinar o mínimo recobrimento das fibras necessário para prevenir a corrosão superficial e relacioná-lo com a razão A/C e a porosidade do betão. A primeira série foi realizada com elevada razão A/C (0.78) e dois tipos diferentes de fibras de aço (40 kg/m³), macro-fibras (extremidades dobradas, comprimento = 30 mm, diâmetro = 0.5 mm) e micro-fibras (lisas, comprimento = 13 mm, diâmetro = 0.17 mm). A segunda série foi realizada com betões de diferentes razões A/C: 0.78, 0.48 e 0.36. Foram produzidos prismas de BRFA com 100×100×500 mm³, os quais foram submetidos a ciclos de imersão em solução salina (uma semana) e secagem (uma semana). Após exposição dos prismas às condições de agressividade ambiental, verificou-se que nos prismas da primeira série, com uma elevada razão A/C, todas as fibras embebidas menos que 1 mm no betão, apresentavam sinais de intensa corrosão. Na segunda série, verificou-se que quando a razão A/C foi reduzida para 0.48, o recobrimento mínimo necessário para prevenir a corrosão superficial diminuiu para 0.1 mm ou 0.2 mm. No entanto, reduzir a razão A/C abaixo de 0.48, não produziu nenhum benefício significativo. Os resultados do número de pontos de corrosão, observados ao longo de 3 meses de exposição das vigas, encontram-se representados na Figura 2.6 (Balouch *et al.*, 2010).

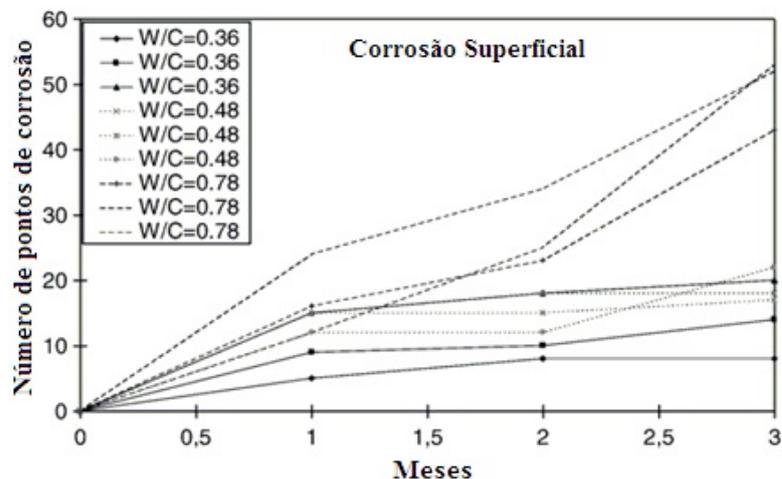


Figura 2.6 - Número de pontos de corrosão vs. período de exposição para diferentes razões A/C (W/C) (adaptado de Balouch *et al.*, 2010)

Deste modo, para prevenir a corrosão superficial do BRFA, o betão deverá possuir, simultaneamente, uma razão A/C menor ou igual a 0.5 e um recobrimento mínimo das fibras maior que 0.2 mm. Se estas duas condições não forem cumpridas, o potencial de corrosão das fibras de aço pode ser minimizado, usando fibras galvanizadas (Balouch *et al.*, 2010).

Uma alternativa ao uso de fibras de aço comerciais no BRFA, é a utilização de fibras de aço recicladas provenientes de pneus usados. A utilização destas fibras poderá ser uma alternativa de reforço bastante vantajosa, devido ao bom comportamento mecânico, ao seu reduzido custo e aos seus favoráveis benefícios ambientais. Graeff *et al.* (2009) realizaram um programa experimental com fibras de aço, comerciais e recicladas, acelerando a corrosão nas fibras através de ciclos de imersão/secagem em solução salina. Durante a cura das vigas com fibras recicladas verificou-se visualmente que algumas fibras à superfície, apresentavam sinais de corrosão e à idade dos ensaios (28 dias) possuíam corrosão superficial mais intensa. Nestas vigas, após a realização dos ensaios de flexão, observou-se na secção de fratura, que os sinais de corrosão ficaram limitados a uma espessura de recobrimento não superior a 10 mm. No caso de vigas com fibras comerciais, os sinais de corrosão limitaram-se às fibras localizadas na superfície.

2.2.2.2 Corrosão em fase não fendilhada

De acordo com Nordstrom (2005), uma vez que as fibras de aço têm um tamanho menor do que o reforço convencional, parecem ser melhor protegidas pelo ambiente alcalino fornecido pelo betão. Em condições onde o reforço convencional mostra elevada taxa de corrosão, as fibras de aço podem ainda estar inalteradas. Por estas razões, as fibras mostram uma excelente durabilidade face ao fenómeno da corrosão quando inseridas em betão homogéneo. No entanto, a corrosão das fibras pode provocar destacamento do betão, assim como, reduzir a secção das fibras, penalizando a durabilidade das estruturas. Este efeito foi verificado no ensaio de difusão de cloretos por migração em regime não estacionário, realizado por Costeira (2011), onde se observou que a corrosão das fibras provocou nos provetes o surgimento de macro-fendas, as quais deverão ter sido causadas pelo aumento do volume das fibras devido à produção de produtos da corrosão, nomeadamente, óxidos de ferro. Importa salientar, que estes resultados foram obtidos para condições de elevada agressividade, as quais dificilmente poderão ser comparadas às condições geralmente encontradas nas construções correntes.

Nos ensaios de flexão realizados por Graeff *et al.* (2009), em vigas com fibras de aço comerciais e recicladas, submetidas previamente a 5 meses de ciclos de imersão/secagem em solução salina, apesar de se ter verificado a ocorrência de micro-spalling, a resistência à flexão das vigas aumentou, sendo este aumento mais pronunciado nas vigas com fibras

comerciais. No entanto, as vigas com fibras recicladas apresentaram uma resistência à compressão mais elevada do que as vigas com fibras comerciais.

2.2.2.3 Corrosão em fase fendilhada

No betão fendilhado, as fibras de aço permitem limitar a abertura de fissura, com consequências benéficas em termos de durabilidade do betão. O início e a propagação da abertura de fissura promovem o aumento da permeabilidade do betão, favorecendo o ingresso de substâncias nocivas (cloretos, CO₂ e sulfatos) que propiciam a ocorrência da corrosão das fibras.

A degradação do betão fendilhado devido à corrosão das fibras, depende de vários parâmetros, nomeadamente, da abertura de fissura, das condições de exposição ambiental e do tipo de fibras (Nordstrom, 2005). No betão fendilhado, a corrosão tende a ocorrer nas fibras de aço que atravessam as fissuras, provocando a redução da secção das fibras. Esta redução afeta negativamente o comportamento mecânico do BRFA, podendo conduzir a uma significativa redução da resistência residual em tração e flexão e da capacidade de absorção de energia. Por outro lado, os produtos da corrosão das fibras causam um aumento do atrito fibra/matriz, melhorando o comportamento de arrancamento da fibra e, conseqüentemente, a resistência à flexão dos elementos de BRFA (Granju e Balouch, 2005). Se a abertura de fissura for muito reduzida (até 0.1 mm), o processo de auto-regeneração (*self-healing*) recupera a integridade do BRFA, tendo a corrosão das fibras um efeito desprezável em termos de desempenho estrutural e de durabilidade (Granju e Balouch, 2005).

Granju e Balouch (2005) investigaram a corrosão do BRFA em amostras de betão fendilhado, com 0.5 mm de abertura de fissura, expostas durante um ano a um ambiente tipo marinho, simulado numa câmara. As amostras foram submetidas a ciclos de uma semana de imersão em solução de 3.5% NaCl e uma semana de secagem. Pelos resultados obtidos verificou-se que a corrosão das fibras não causou o destacamento (*spalling*) do betão. Apenas as fibras localizadas nas fissuras, numa distância menor que 3 mm da superfície, apresentavam intensa corrosão. Nas fibras a maior profundidade apenas uma leve corrosão foi observada, sem redução da secção da fibra. A corrosão verificada nas fibras concentrou-se no plano da fissura e ao nível da dobra da fibra (Figura 2.7).

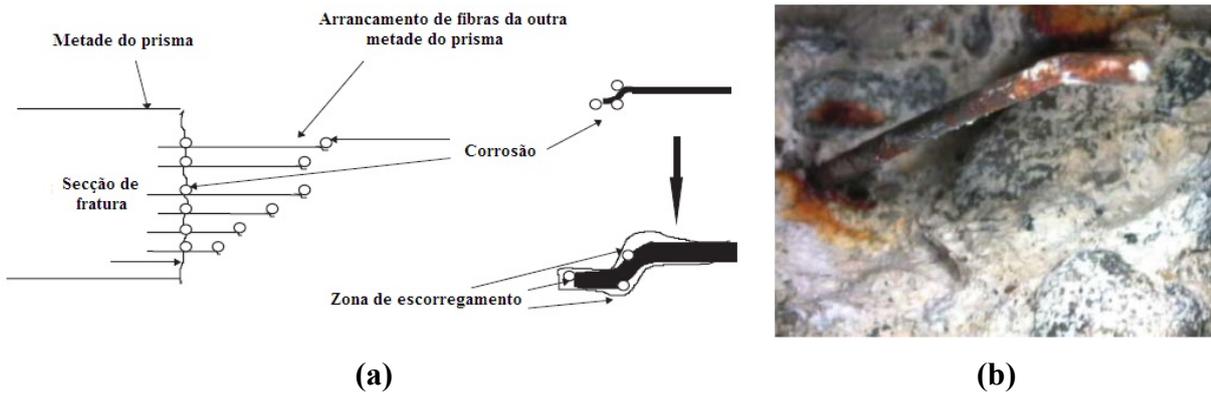
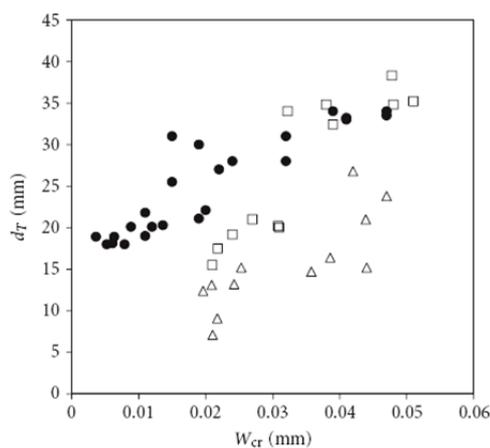


Figura 2.7 - (a) - Detalhe da corrosão observada nas fibras na secção da fissura e (b) - Fotografia da fibra corroída (adaptado de Granju e Balouch, 2005)

Yoon (2012) realizou um estudo para avaliar o efeito da penetração de cloretos através de fissuração em provetes de BRFA. Nos provetes, onde a máxima abertura de fissura foi limitada a 0.012 mm, a fissuração não é efetiva a penetração de cloretos. O reforço com fibras de aço permite reduzir a penetração de cloretos através das fissuras, uma vez que as fibras reduzem significativamente o comprimento destas (Figura 2.8) . Numa determinada fissura, as fibras provocam o aumento do comprimento crítico da fissura, d_2-d_e , correspondente à abertura de fissura crítica, W_{cri} de 0.012 mm, e diminuem o comprimento efetivo da fissura, d_e (Figura 2.9). Deste modo, o aumento do teor de fibras diminui a penetração de substâncias agressivas no betão.



- Betão convencional
- Betão de elevado desempenho
- △ Betão de elevado desempenho reforçado com fibras de aço

Figura 2.8 - Profundidade de penetração de cloretos na zona da fissura, d_T , em função da abertura de fissura, W_{cr} (Yoon, 2012)

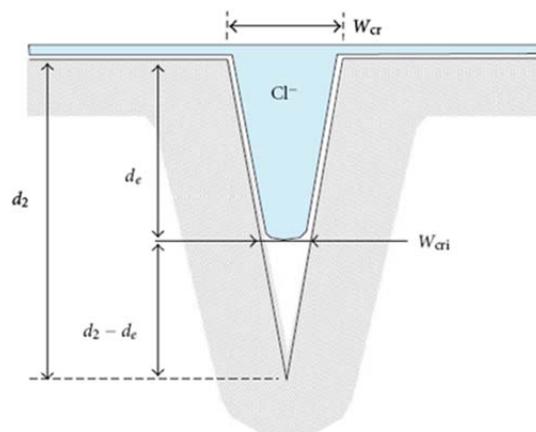


Figura 2.9 - Representação do comprimento efetivo da fissura de acordo com o comprimento crítico da fissura (Yoon, 2012)

Apesar do teor de fibras utilizado e da distribuição homogénea das fibras no betão terem um efeito significativo na fissuração do betão, o diâmetro máximo dos agregados, $D_{máx}$ também influencia a penetração de cloretos. Com um $D_{máx}$ de 16 mm, a difusibilidade relativa de iões no betão de elevado desempenho tende a ser maior do que com um $D_{máx}$ de 8 mm, devido ao facto da propagação da fissuração se realizar com maior facilidade no betão com agregados de maior dimensão (Yoon, 2012).

Para aberturas de fissura menores que 0.08 mm, alguns sistemas de tratamento de superfícies, como impermeabilizantes e revestimentos, poderão ser considerados para tratamento de fissuras no betão, sendo considerada uma boa opção em termos económicos e de desempenho de durabilidade. O impermeabilizante é aplicado na zona da fissura e forma uma fina camada de preenchimento dos poros, apesar de não impermeabilizar completamente a fissura. O revestimento é também aplicado na zona da fissura e forma uma membrana polimérica com a espessura pretendida, impedindo a penetração de cloretos até aberturas de fissura máximas de 0.06 mm, em fissuras não activas. Usando uma combinação de ambos os tratamentos, impermeabilizante e revestimento, forma-se uma barreira efetiva que impede a penetração de cloretos no betão fissurado, até um máximo de 0.08 mm de abertura de fissura (Yoon, 2012).

Solgaard *et al.* (2010) realizaram um programa de investigação através de simulações numéricas e ensaios experimentais sobre a suscetibilidade de varões de aço à corrosão por cloretos. Com o intuito de avaliar a influência do reforço com fibras de aço, os varões de aço foram envolvidos, num caso, com betão simples e noutra caso, com BRFA. Através da medição experimental da resistividade elétrica e avaliando as propriedades mecânicas do BRFA, Solgaard *et al.* (2010) propuseram um modelo numérico de simulação da formação e propagação de fissuras no betão, causadas por corrosão de varões de aço convencionais. O modelo proposto para além de simular a corrosão dos varões de aço, também simula a corrosão das fibras de aço para uma abertura de fissura máxima de 0.1 mm. Os resultados das simulações indicaram que as fibras do BRFA limitaram a abertura de fissura, tendo atrasado a intensidade de corrosão e os consequentes efeitos prejudiciais. Este benefício do reforço com fibras aumenta com a espessura de recobrimento. Nas Figuras 2.10 e 2.11 apresentam-se as relações obtidas de abertura de fissura em função da espessura dos produtos da corrosão (t_{cor}), ao nível do varão de aço e ao nível da superfície do betão, quer no betão simples (BS) como no BRFA (Solgaard *et al.*, 2010).

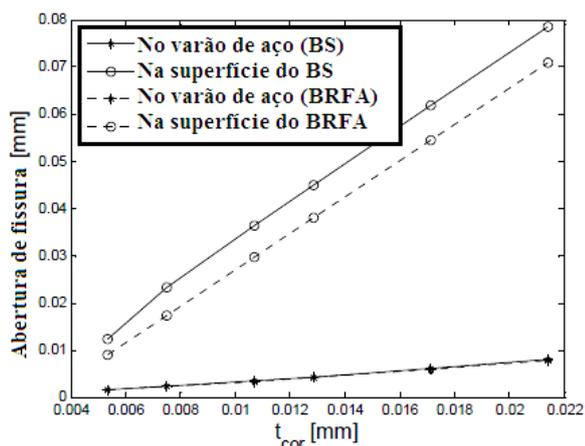


Figura 2.10 - Abertura de fissura vs. espessura dos produtos de corrosão (t_{cor}) para uma espessura de recobrimento de 20 mm (adaptado de Solgaard *et al.*, 2010)

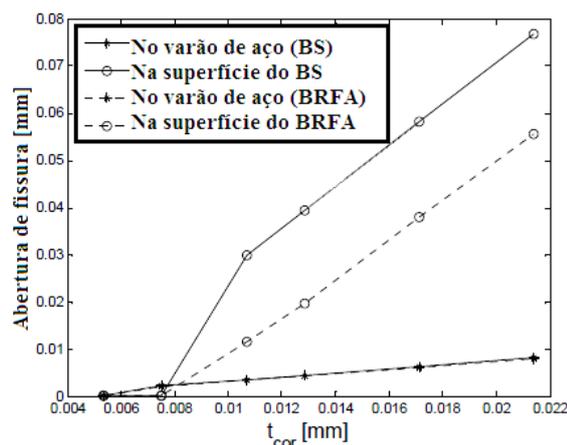


Figura 2.11 - Abertura de fissura vs. espessura dos produtos de corrosão (t_{cor}) para uma espessura de recobrimento de 40 mm (adaptado de Solgaard *et al.*, 2010)

Comparando a Figura 2.10 com a Figura 2.11, verifica-se que para uma determinada abertura de fissura ao nível da superfície do betão, uma espessura de recobrimento de 20 mm de BRFA, tem o mesmo efeito em termos de proteção à corrosão dos varões de aço convencional que uma espessura de recobrimento de 40 mm de betão simples. Na Figura 2.11 verifica-se, também, que para uma espessura de recobrimento de 40 mm, as fibras promovem uma diminuição de 30% da abertura de fissura à superfície do betão, para uma espessura de produtos de corrosão maior que 0.01 mm (Solgaard *et al.*, 2010).

Nordstrom (2005) investigou a corrosão das fibras de aço em amostras de BRFA projetado fendilhado, em obra e em laboratório. Nos ensaios em obra verificou que a propagação da corrosão no BRFA projetado fendilhado estabilizou ao fim de um período de 5-15 anos de exposição, mesmo na presença de elevada concentração de cloretos. É comum verificar-se a perda de 15-20% do diâmetro das fibras localizadas na zona superficial numa espessura de 25 mm. Num ambiente de cloretos, as amostras com fibras longas (40 mm) apresentaram quase o dobro do ataque corrosivo do que as amostras com fibras curtas (30 mm). Os estudos laboratoriais, realizados por intermédio de ensaios acelerados de exposição por métodos eletroquímicos, indicaram um comportamento semelhante ao verificado em obra, i.e., um aumento do ataque de corrosão com o aumento da abertura de fissura e do comprimento da fibra (Nordstrom, 2005). A influência da abertura de fissura é importante, principalmente durante o início do processo de corrosão. Após um elevado período de exposição, o ataque de corrosão estabiliza, independentemente da abertura de fissura. Norsdtrom (2005) também

verificou que a condutividade elétrica do betão aumentou com o comprimento da fibra, aumentando a taxa de corrosão.

2.3.3 Resistividade elétrica

A resistividade elétrica é um dos parâmetros que mais influencia a suscetibilidade do betão a fenómenos de corrosão, podendo ser usada para, indiretamente, avaliar a permeabilidade aos fluidos e a difusibilidade de iões cloreto em materiais porosos como o betão (Whiting *et al.*, 2003). A sua medição, em conjunto com a medição do potencial elétrico, são cada vez mais utilizadas na inspeção de estruturas para prever os níveis de corrosão que possam existir. Uma baixa resistividade está correlacionada com uma alta intensidade de corrosão (Polder *et al.*, 2000).

O processo de adição de fibras ao betão e a geometria das fibras conduz a que, em geral, as fibras não tenham contacto entre si e componham um elemento contínuo capaz de propagar a intensidade de corrosão necessária para alterar a fiabilidade das fibras (ACI-544.5R-10, 2010). De acordo com a RILEM TC 154-EMC (2004), a resistividade elétrica proporciona informação sobre o risco de corrosão, por existir uma relação linear entre a intensidade de corrosão e a condutividade eletrolítica (Ferreira, 2000). Esta relação é esperada existir também no BRFA, mas menos pronunciada devido ao carácter discreto das fibras.

Tsai *et al.* (2009) realizaram ensaios em BACRFA e concluíram que a resistividade elétrica diminui com o aumento da dosagem de fibras no betão, devido à condutividade das fibras de aço. No entanto, os produtos provenientes da reação de hidratação do cimento e da reação dos materiais pozolânicos utilizados tornam a microestrutura do betão densa, fazendo diminuir o efeito da maior condutividade das fibras de aço face aos restantes constituintes do betão.

Tsai *et al.* (2009) também verificaram que a resistividade elétrica aumenta com a idade do betão (Figura 2.12). A adição de 1% de fibras de aço ao betão atinge a resistividade elétrica desejada de 20 k Ω .cm (proposta por Taylor Woodrow (1980) para betão convencional) aos 100 dias de idade. No entanto, para BRFA este valor pode não ser válido, devido à influência da condutividade das fibras de aço no campo elétrico gerado pelo resistímetro.

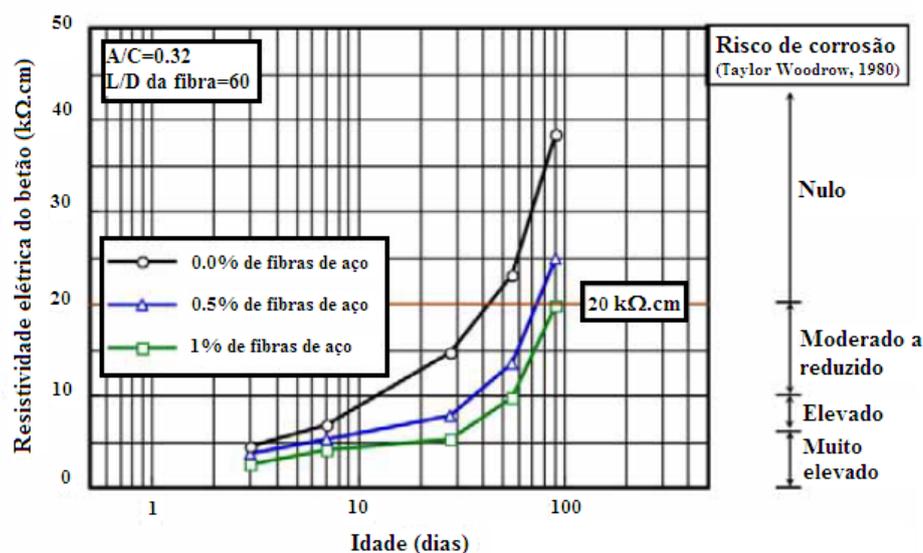


Figura 2.12 - Efeito do teor de fibras na resistividade elétrica do BACRFA em função da idade do betão (adaptado de Tsai *et al.*, 2009)

2.3.4 Ação do gelo - degelo

Ainda são escassos os estudos da resistência do BRFA ao gelo-degelo. No entanto, uma das conclusões a que se tem chegado, é que a principal variável que altera a resposta do BRFA aos ciclos gelo-degelo é a sua composição (razão A/C, dimensão dos agregados e adições) (Rider *et al.*, 1980). Contudo, não é de desprezar o facto de a presença das fibras permitir a restrição da abertura de fissuras, formadas pelas tensões provocadas pela brusca variação térmica e consequente expansão da matriz (Trottier *et al.*, 2001).

Tanesi *et al.* (2004) desenvolveram uma pesquisa onde estudaram o comportamento de betão de alto desempenho reforçado com fibras de aço, com diversas propriedades estruturais (resistência à compressão superior a 200MPa, uma resistência significativa à tração, elevada ductilidade e uma maior durabilidade), com o intuito de ser utilizado em infra-estruturas de transporte rodoviário. As amostras foram submetidas a 690 ciclos de gelo-degelo, 5 horas a -18°C e mais 5 horas a 4.5°C . Concluíram que a resistência deste compósito ao gelo-degelo é elevada.

Miao *et al.* (2002) estudaram a ação do gelo-degelo, variando a temperatura entre -17°C e 6°C , em betões com e sem fibras de aço. Segundo eles, uma vez que as fibras de aço retardam a iniciação e propagação de microfissuras, estas desaceleram os danos no betão durante os ciclos de gelo-degelo.

2.3.5 Ação dos sulfatos

Os sulfatos são agentes bastante agressivos para o betão. Podem ser encontrados em várias formas: sulfato de sódio, sulfato de potássio, sulfato de magnésio e sulfato de cálcio, sendo todos estes sais altamente solúveis.

Miao *et al.* (2002) estudaram a ação dos sulfatos em amostras de betão com fibras de aço e sem fibras (com A/C de 0.44, 0.32 e 0.26), submetidas a ciclos de gelo-degelo. Os ciclos foram realizados em água destilada e em soluções com 5% (em massa) de sulfato de sódio. Durante a realização dos primeiros 300 ciclos verificaram que a solução de sulfato de sódio provoca um ligeiro decréscimo no módulo de elasticidade do betão, que se acentua com a realização de mais ciclos. Ambas as amostras, com fibras e sem fibras, de 0.44 de razão A/C, após sujeitas a 300 ciclos de gelo-degelo em solução de sulfato de sódio e em água destilada, apresentavam resultados semelhantes do módulo de elasticidade. Para as amostras com uma razão A/C de 0.26, o decréscimo do módulo de elasticidade é mais acentuado (60%) nas amostras submetidas a ciclos em solução de sulfato de sódio.

Mais recentemente, Al-shannag (2007) estudou a durabilidade do BRFA em ambiente com sulfatos. Neste caso, as amostras foram submetidas a imersão, por um máximo de 12 meses, em água destilada, em soluções de sulfato de sódio e de sulfato de magnésio. Os resultados mostraram que as amostras não fissuradas, imersas em soluções de sulfatos, apresentavam um significativo aumento da resistência à flexão e uma reduzida diminuição da resistência à tração, quando comparadas com as amostras de controlo, imersas em água destilada. Já as amostras pré-fissuradas apresentavam resultados muito semelhantes aos das amostras não fissuradas, quando submetidas ambas a soluções com sulfatos.

2.3.6 Resistência ao fogo

O betão é mais resistente à ação de temperaturas elevadas do que a madeira ou o aço devido à sua reduzida condutividade térmica e por não ter um comportamento combustivo, quando exposto ao fogo. Alguns constituintes do betão, como o cimento e determinados agregados, têm tendência a ser estáveis, química e mecanicamente, quando expostos a elevadas temperaturas. No entanto, outros constituintes do betão, nomeadamente, os principais produtos da hidratação do cimento, são menos resistentes a temperaturas elevadas, podendo causar perda de água, microfissuração e danos por expansão diferencial.

A adição de fibras de aço ao betão, geralmente, melhora o desempenho das estruturas de BRFA quando expostas a temperaturas elevadas e ao fogo. No entanto, escassos ensaios têm sido realizados para avaliar a resistência ao fogo do BRFA (ACI 544.5R-10, 2010). Lourenço (2012) realizou medições da resistividade elétrica em provetes de BACRFA para avaliar a influência da temperatura no potencial de corrosão do betão, após expor os provetes a elevadas temperaturas. Os resultados obtidos mostraram uma redução da resistividade com o aumento da temperatura, o que significa que as temperaturas elevadas aumentam o risco de corrosão das fibras no BACRFA.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E COMPOSIÇÕES

3.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se a caracterização dos materiais utilizados, assim como as respetivas composições adotadas de BAC e de BACRFA na produção dos provetes a utilizar nos ensaios de avaliação do betão no estado fresco, de caracterização mecânica e de avaliação da durabilidade.

3.2 Materiais

3.2.1 Cimento

O cimento utilizado foi um cimento Portland tipo I classe 42.5 R (CEM I 42.5R) da SECIL – Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A., certificado de acordo com a Norma NP EN 197-1 (2001). Nos Quadros 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 apresentam-se, respetivamente, as principais características químicas, mecânicas e físicas, a composição química e a composição potencial do cimento de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante.

Quadro 3.1 - Características químicas do cimento

Propriedades	Método de Ensaio	Valor (%)
Perda ao fogo	NP EN 196-2	3.20
Resíduo insolúvel	NP EN 196-2	0.90
Teor de Sulfatos (em SO ₃)	NP EN 196-2	3.33
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	0.02
Cal livre	NP EN 451-1	1.28

Quadro 3.2 - Características mecânicas do cimento

Resistência à Compressão (MPa), NP EN 196-1		
2 dias	7 dias	28 dias
34.4	46.8	57.2
Resistência à Flexão (MPa), NP EN 196-1		
2 dias	7 dias	28 dias
6.1	7.8	8.9

Quadro 3.3 - Características físicas do cimento

Propriedades	Método de Ensaio	Valor
Massa volúmica (kg/m ³)	LNEC E-64	3150
Superfície específica Blaine (m ² /kg)	NP EN 196-6	3873
Resíduo 45 µm (%)	NP EN 196-6	2.00
Princípio de Presa (min)	NP EN 196-3	Início: 116; Fim: 147
Expansibilidade (mm)	NP EN 196-3	0.70

Quadro 3.4 - Composição química do cimento

Composição	Símbolo	Valor (%)
Óxido de silício	SiO ₂	19.82
Óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	4.22
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	3.40
Óxido de cálcio	CaO	62.66
Óxido de magnésio	MgO	3.47

Quadro 3.5 - Composição potencial do cimento

Composição	Símbolo	Valor (%)
Silicato tricálcico	C ₃ S	64.39
Silicato bicálcico	C ₂ S	5.24
Aluminato tricálcico	C ₃ A	6.26
Aluminoferrato tretacálcico	C ₄ AF	9.42
Sulfato de cálcio	CS	5.66

3.2.2 Fíler Calcário

O Fíler calcário consiste em calcário pulverizado cujo principal componente é a calcite (CaCO₃). Neste caso, o filer utilizado foi fornecido pela Omya Comital - Minerais e Especialidades, SA. (Figura 3.1). Do ponto de vista químico é quase inerte e por essa razão é considerada uma adição do tipo I de acordo com a NP EN 206-1 (2007). Esta adição é correntemente utilizada, quando se pretende aumentar a viscosidade da pasta de betão, em especial quando se pretende que o aumento da quantidade de finos, não se traduza diretamente num aumento da resistência do betão. Nos Quadros 3.6 e 3.7 apresentam-se as principais características físicas e químicas do filer calcário de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante.

Quadro 3.6 - Características físicas do filer calcário

Propriedades	Método de Ensaio	Valor
Massa volúmica (kg/m ³)	LNEC E-64	2360
Superfície específica Blaine (m ² /kg)	NP EN 196-6	3879
Partículas < 75 µm (%)	NP EN 933-10	81.15-94.40
Partículas < 45 µm (%)	NP EN 933-10	68.45-85.90

Quadro 3.7 - Características químicas do filer calcário

Composição	Símbolo	Valor (%)
Carbonato de cálcio	CaCO ₃	99.0
Carbonato de magnésio	MgCO ₃	0.3
Óxidos de ferro	Fe ₂ O ₃	0.02
Insolúveis em HCl		0.2
Teor de sulfatos solúveis em ácido	SO ₃	<0.05
Teor de cloretos	Cl	<0.001
Teor de enxofre total	S	<0.04



Figura 3.1 - Filer Calcário

3.2.3 Água

A água utilizada para a hidratação do cimento e início do processo de presa, foi a água potável proveniente do sistema de abastecimento de água da rede pública da CiviTest, em Vila Nova de Famalicão. A razão água / cimento (A/C) adotada foi de 0.31 para as duas composições, BAC e BACRFA, uma vez que as propriedades do betão dependem em grande parte deste parâmetro, pelo que, é importante que seja igual em ambos os betões, para comparação e análise de resultados. O valor da razão A/C adotado resultou de estudos da composição do betão, realizados no âmbito do projeto de investigação em causa, tendo sido este o valor encontrado para obtenção de um betão de boa qualidade, em termos de resistência mecânica e

de durabilidade, respeitando simultaneamente as exigências de trabalhabilidade e de resistência à segregação.

3.2.4 Agregados

Os agregados utilizados foram duas areias (uma fina e outra meia areia) e uma brita 12, para que os elementos de menores dimensões preencham os espaços deixados pelos de maiores dimensões, proporcionando uma resistência superior à segregação, uma maior compacidade e fluidez e conseqüentemente um melhor comportamento da trabalhabilidade (Figura 3.2). Os agregados foram fornecidos pela Unibetão e apresentam-se na Figura 3.3 e no Quadro 3.8 as curvas granulométricas, obtidas por peneiração utilizando a série de peneiros ASTM de malha quadrada (análise realizada pela CiviTest).

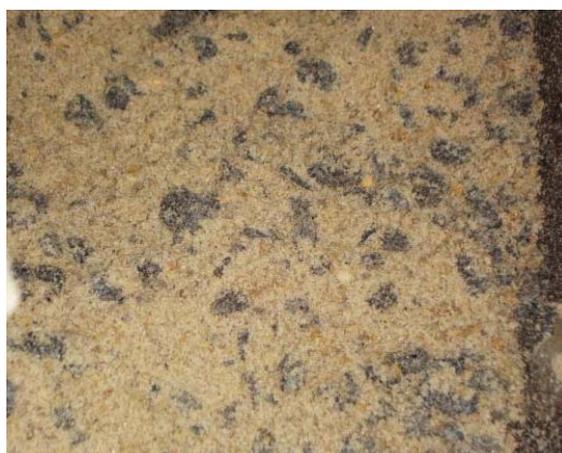


Figura 3.2 - Agregados

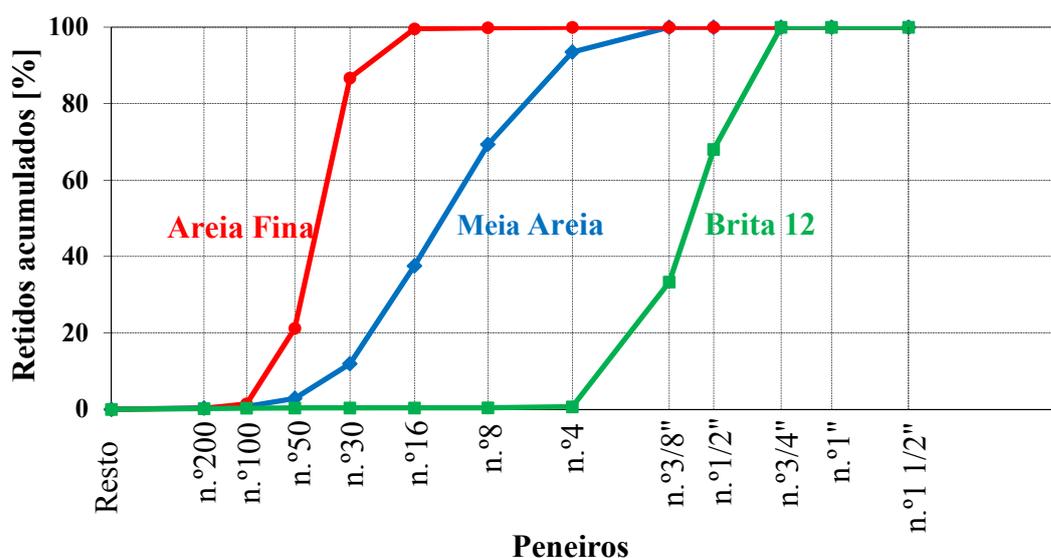


Figura 3.3 - Curvas granulométricas dos agregados

Quadro 3.8 - Análise granulométrica dos agregados

Peneiro ASTM		% Retidos acumulados		
N.º	mm	Areia Fina	Meia Areia	Brita 12
1 1/2"	38.100	0.00	0.00	0.00
1"	25.400	0.00	0.00	0.00
3/4"	19.100	0.00	0.00	0.00
1/2"	12.700	0.00	0.00	31.98
3/8"	9.520	0.00	0.00	66.70
4	4.760	0.03	6.51	99.35
8	2.380	0.15	30.69	99.62
16	1.190	0.42	62.45	99.62
30	0.590	13.30	88.08	99.64
50	0.297	78.81	97.15	99.65
100	0.149	98.56	99.23	99.70
200	0.074	99.76	99.67	99.81
Resto		100.00	100.00	100.00
D_{máx} (ASTM) (mm)		1.19	4.76	19.10
D_{mín} (ASTM) (mm)		0.15	0.30	4.76
Módulo de Finura (%)		1.91	3.84	6.64
Perda de material (%)		0.32	0.28	0.01
Massa volúmica (kg/m³)		2609	2630	2613
Absorção de água (%)		0.16	0.51	1.06

3.2.5 Superplastificante

A utilização de superplastificante na produção do BAC é determinante para assegurar os requisitos de auto-compactabilidade com recurso a teores A/C relativamente baixos. Nas presentes composições de BAC o valor ótimo da razão A/C foi de 0.31.

No desenvolvimento dos betões em estudo foi utilizado o adjuvante químico ViscoCrete 3005 da Sika. Este adjuvante permite obter uma muito forte plastificação e uma boa manutenção de consistência, resultando betões com forte aumento de resistências mecânicas, compacidade elevada e permeabilidade muito baixa. No Quadro 3.9 apresentam-se as suas principais características, em conformidade com a norma EN 934-2.

Quadro 3.9 - Características do ViscoCrete 3005 da Sika

Características	ViscoCrete 3005
Aspeto	Líquido castanho claro
Massa Volúmica (kg/dm^3)	1.05 ± 0.02
pH	4.0 ± 1.0
Teor de sólidos (%)	25.5 ± 1.2
Teor em iões cloreto (%)	<0.1
Dosagem recomendada (% do peso do cimento)	1.0 a 1.4



3.2.6 Fibras de aço

As fibras de aço utilizadas foram as de referência RAD 65/35 HW da Radmix. Estas fibras são fabricadas em aço de baixo teor de carbono, possuem extremidades dobradas (*hooked end*), comprimento $l_f = 35$ mm, diâmetro $d_f = 0.50$ mm, esbelteza $l_f/d_f = 70$ e resistência à tração de 1300 MPa (Figura 3.4).



Figura 3.4 - Fibras de aço RAD 65/35 HW da Radmix

3.3 Composições de BAC e BACRFA

O método de conceção das composições do BAC e do BACRFA foi realizado pela empresa CiviTest, cujos detalhes podem ser consultados em Pereira (2006), e que considera as seguintes fases:

- 1) Afinação da composição da pasta ligante;

- 2) Determinação da composição do esqueleto sólido, em que as percentagens relativas de cada um dos constituintes são determinadas. A influência do tipo e quantidade de fibras na composição é considerada nesta fase, participando como um agregado de elevada esbelteza, uma vez que as fibras alteram a organização do esqueleto sólido da composição;
- 3) Obtenção da percentagem de pasta por m³ de BAC e de BACRFA, de modo a garantir as características de auto-compactabilidade requeridas, nomeadamente, espalhamento suficientemente elevado, velocidade de escoamento correta, adequada capacidade de se adaptar e ultrapassar obstáculos, e resistência aos fenómenos de segregação e exsudação.

As composições definidas do BAC e do BACRFA estão apresentadas no Quadro 3.10, com a dosagem de cada componente por m³.

Quadro 3.10 - Composições do BAC e do BACRFA por m³

	Cimento	Filer Calcário	Água	Areia fina	½ Areia	Brita	SP	Fibras	A/C
	(kg)	(kg)	(dm ³)	(kg)	(kg)	(kg)	(dm ³)	(kg)	-
BAC	413	353	127.8	198	722	648	7.83	0	0.31
BACRFA	413	353	127.8	195	713	640	7.83	60	0.31

O teor de fibras adotado na execução do BACRFA, de 60 kg/m³, foi definido com base em investigação anterior no domínio da composição do BACRFA e do seu processo de amassadura. Esta quantidade de fibras foi considerada a mais adequada para obtenção de um BACRFA com elevadas propriedades mecânicas, sem afetar as suas propriedades de auto-compactabilidade da mistura. Com o intuito de obter dois betões, BAC e BACRFA, com a mesma razão A/C e a mesma trabalhabilidade, no estudo da composição do BACRFA o volume de fibras foi substituído por volume de agregados, reduzindo a quantidade de areia fina em 1.5% e a meia areia e a brita 12 em 1.2%.

Os provetes moldados de BAC e de BACRFA apresentavam dimensões de modo a respeitar as especificações das diferentes normas utilizadas, que impõem dimensões específicas para cada ensaio. No Quadro 3.11 apresenta-se a quantidade e as dimensões dos provetes produzidos de cada composição em estudo, de acordo com o ensaio a realizar. Por precaução, foram moldados alguns provetes extra para o caso de ser necessário repetir algum ensaio.

Quadro 3.11 - Provetes moldados para os ensaios de caracterização mecânica e de avaliação da durabilidade (BAC e BACRFA)

Caracterização mecânica	Provetes moldados
Módulo de elasticidade (<i>prEN 12390-13, 2012</i>)	4 provetes cilíndricos (ϕ 150 mm \times 300 mm)
Resistência à compressão (<i>NP EN 12390-3, 2003</i>)	4 provetes cilíndricos (ϕ 150 mm \times 300 mm)
Resistência à flexão (<i>RILEM TC 162 TDF, 2002</i>) (<i>CEB-FIP MODEL CODE, 2010</i>)	4 vigas (150 \times 150 \times 600 mm ³)
Avaliação da durabilidade	Provetes moldados
Absorção de água por imersão (<i>LNEC E394, 1993</i>)	3 provetes cúbicos (100 mm)
Absorção de água por capilaridade (<i>LNEC E393, 1993</i>)	3 provetes cúbicos (100 mm)
Permeabilidade ao ar e à água	4 provetes cilíndricos (ϕ 50 mm \times 40 mm)
Resistividade elétrica (<i>RILEM.TC.154-EMC, 2004</i>)	4 provetes cilíndricos (ϕ 150 mm \times 300 mm)
Difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário (<i>LNEC E463, 2004</i>)	3 provetes cilíndricos (ϕ 100 mm \times 50 mm)
Resistência à penetração de cloretos (<i>LNEC E390, 1993</i>)	3 provetes cilíndricos (ϕ 100 mm \times 100 mm)
Carbonatação (<i>prCEN/TS 12390-12, 2010</i>)	1 viga (100 \times 100 \times 600 mm ³)

Antes da execução das amassaduras foram preparados os moldes prismáticos e cilíndricos previstos, aplicando óleo descofrante em todas as superfícies interiores dos moldes para facilitar a desmoldagem, o que ocorreu três a quatro dias, período este dedicado à cura do betão.

3.3.1 Procedimento da amassadura

As betonagens dos provetes de BAC e de BACRFA foram realizadas na empresa CiviTest, em local interior fresco e protegido.

De acordo com a capacidade volumétrica da betoneira, para realizar a betonagem de todos os moldes cilíndricos e prismáticos previstos foi necessário realizar duas amassaduras de cada tipo de betão, de 150 litros cada.

Os equipamentos utilizados para a mistura de materiais na produção de betão foram: uma balança de precisão, uma betoneira de eixo horizontal com capacidade de 160 litros, recipientes para acondicionamento de agregados para a pesagem, água e outros utensílios usados na produção e manuseamento de betão fresco, como luvas, colheres, baldes, etc.

As paredes da betoneira foram humedecidas previamente à sua utilização, de modo a minimizar o desperdício de água da composição e o alojamento de materiais nas paredes da betoneira.

A primeira etapa consistiu em pesar corretamente todos os materiais, segundo a composição definida. Depois de pesados, todos os materiais foram colocados na proximidade da betoneira, para evitar qualquer demora na sua introdução no equipamento de mistura (Figura 3.5).



(a)



(b)

Figura 3.5 - **(a)** Betoneira e **(b)** Materiais

Todas as amassaduras foram realizadas segundo o seguinte procedimento:

- 1) Secagem dos agregados em estufa e posterior arrefecimento dos mesmos;
- 2) Colocação dos agregados na betoneira pela seguinte ordem: brita 12, areia e meia-areia até se atingir uma mistura homogénea (Figura 3.6);
- 3) Introdução de 10% da água total para molhagem dos agregados (Figura 3.7);
- 4) Colocação da betoneira em funcionamento para a molhagem dos agregados;
- 5) Introdução do fíler calcário, seguindo-se o cimento (Figuras 3.8 e 3.9);
- 6) Com a betoneira em funcionamento adicionou-se gradualmente 2/3 da água total para agregar os materiais já incluídos e humedecer o cimento e o fíler adicionado;
- 7) Passados 3 minutos da adição de 2/3 da água total, introduziu-se o superplastificante (agente redutor de água) de forma continuada;
- 8) No caso do BACRFA, adicionou-se lentamente as fibras e de forma gradual, de modo a assegurar uma distribuição destas o mais homogénea possível. Esta fase é acompanhada pela inclusão de pequenas quantidades de água na mistura (perfazendo o 1/3 da água remanescente), mantendo a misturadora em funcionamento, para não formar aglomerações de agregados.

Nas Figuras 3.11 e 3.12 apresentam-se, respetivamente, o aspeto final das amassaduras de BAC e BACRFA.



Figura 3.6 - Mistura de agregados



Figura 3.7 - Introdução da água



Figura 3.8 - Introdução do filer calcário



Figura 3.9 - Introdução do cimento



Figura 3.10 - Produção de BAC



Figura 3.11 - Produção de BACRFA

Após a realização das amassaduras, de modo a verificar a trabalhabilidade do betão, realizaram-se os ensaios de avaliação das propriedades do betão no estado fresco, apresentados no ponto 4.1 do Capítulo 4.

Realizada a verificação da trabalhabilidade do betão, encheram-se os moldes com a mistura. A desmoldagem foi realizada após três a quatro dias de cura do betão (Figura 3.12). De salientar que, devido às propriedades de auto-compactibilidade das amassaduras, não foi realizada compactação da mistura nos moldes.



(a)



(b)

Figura 3.12 - (a) Enchimento dos moldes e (b) provetes desmoldados

A cura dos provetes foi realizada em água à temperatura $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, até imediatamente antes da realização dos ensaios, de acordo com os procedimentos recomendados para betões convencionais, norma NP EN 12390-2 (2009) (Figura 3.13).



Figura 3.13 - Cura dos provetes em água à temperatura ambiente

CAPÍTULO 4

CARACTERIZAÇÃO DO BAC E DO BACRFA

4.1 Introdução

No presente capítulo apresentam-se as metodologias utilizadas e os resultados obtidos nos ensaios de caracterização do BAC e do BACRFA no estado fresco, bem como de caracterização do comportamento mecânico e dos indicadores relativos à durabilidade no estado endurecido.

4.2 Avaliação das propriedades do betão fresco

Imediatamente a seguir à conclusão das amassaduras de BAC e de BACRFA foram realizados alguns ensaios de modo a verificar se o betão fresco satisfazia os critérios de auto-compactabilidade, tais como: capacidade de preenchimento, resistência à ocorrência de segregação e capacidade de escoar entre espaços estreitos (EFNARC, 2002). Para tal foram efetuados os ensaios de espalhamento (“*Slump-flow test*”), da caixa L (“*L-Box test*”), de fluidez (“*V-funnel test*”), de determinação do teor de ar e de massa volúmica. Estes ensaios, embora estejam normalizados para o BAC, ainda não o estão para o BACRFA, pelo que não existe um consenso acerca dos critérios de aceitação.

4.2.1 Ensaio de espalhamento (“*Slump-flow test*”)

4.2.1.1 Descrição do ensaio

O ensaio de espalhamento é de simples e rápida execução, consistindo em avaliar a trabalhabilidade e fluidez do betão fresco sem qualquer tipo de obstrução, podendo fornecer também, por observação visual, alguma indicação em relação à capacidade de resistência de segregação e exsudação. O ensaio foi realizado de acordo com a norma NP EN 12350-8 (2010).

Este ensaio consiste em encher o cone de Abrams, sem qualquer tipo de apiloamento, o qual se encontra por cima de uma placa perfeitamente horizontal que contém inscrito um círculo de

500 mm (Figura 4.1). As dimensões do cone encontram-se especificadas na norma NP EN 12350-2 (2009).

Após a introdução do betão no cone, este é levantado lentamente e de forma contínua, cronometrando-se o tempo que demora o betão a atingir o diâmetro de 500 mm (T_{500}) (Figura 4.2). Quando o betão pára de escoar, mede-se o diâmetro final, em duas direções perpendiculares e determina-se a média entre estes dois valores, que corresponde ao valor do espalhamento (D_{final}).

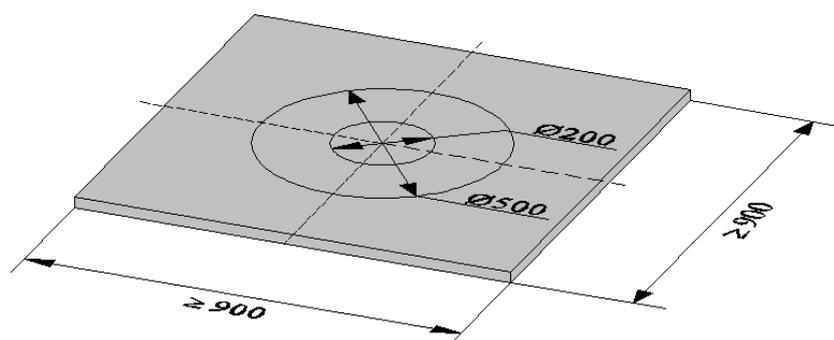


Figura 4.1 - Placa para o ensaio de espalhamento (unidades em mm)



Figura 4.2 - Ensaio de espalhamento

4.2.1.2 Análise de Resultados

Realizou-se um ensaio de espalhamento por cada amassadura, num total de dois ensaios por cada composição. No Quadro 4.1, apresentam-se os resultados médios obtidos nos ensaios de espalhamento.

Quadro 4.1 - Resultados dos ensaios de espalhamento

		T₅₀₀ (s)	D_{final} (mm)
BAC	Média	10.25	673
	Desvio padrão	3.14	12
	Coefficiente de variação (%)	31.00	1.73
BACRFA	Média	15.57	668
	Desvio padrão	3.22	60
	Coefficiente de variação (%)	21.13	9.00

Segundo EFNARC (2002), o tempo para o betão atingir os 500 mm de diâmetro (T_{500}) deve estar compreendido entre 4 e 10 segundos para misturas com viscosidades moderadas, sendo que, quanto maior for o tempo para alcançar o diâmetro de 500 mm, maior é a viscosidade e a coesão do betão.

No caso do D_{final} , este deve estar compreendido entre 650 a 800 mm, para que seja considerado um betão auto-compactável.

De acordo com os resultados apresentados no Quadro 4.1, verifica-se que o BACRFA revela maior viscosidade e coesão que o BAC e que a condição de auto-compactabilidade é verificada para os dois betões produzidos, apesar de se verificar uma ligeira redução da trabalhabilidade do BACRFA, relativamente ao BAC devido à presença das fibras.

4.2.2 Ensaio na caixa L (“*L-Box test*”)

4.2.2.1 Descrição do ensaio

Este ensaio permite avaliar a capacidade de escoamento do betão entre espaços estreitos, nomeadamente entre as armaduras, sem que ocorra segregação nem congestionamento do betão junto aos obstáculos encontrados por este. O ensaio é realizado com um equipamento que contém um depósito vertical, com capacidade aproximada de 12 litros, que é ligado a um canal horizontal através de uma porta com as dimensões do canal de atravessamento, onde se coloca uma grelha metálica de forma a simular os obstáculos criados pelas armaduras (Figura 4.3). O espaçamento dos varões da grelha metálica depende do tamanho máximo dos inertes grossos e deve reproduzir a distância mínima entre as armaduras prevista na aplicação real. A grelha metálica da caixa L utilizada é constituída por 3 varões de 12 mm de diâmetro, afastados de 41 mm.

O ensaio foi realizado de acordo com a norma EN 12350-10 (2010).

O procedimento deste ensaio consiste em encher o compartimento vertical com betão, abrir de seguida a comporta e medir os tempos que o betão leva a alcançar uma distância de 200 mm (T_{200}) e 400 mm (T_{400}) no canal horizontal (Figura 4.4). Estes valores são utilizados para avaliar a capacidade de deformação do betão. Aquando da estabilização do escoamento, registam-se, também, as alturas H_1 e H_2 , cujo significado é ilustrado na Figura 4.3.

Com base nas medidas de altura H_1 e H_2 , registadas nas paredes extremas deste aparelho, quando o betão se encontra em repouso, determina-se o fator H_2/H_1 que define o coeficiente de bloqueio. Este fator é utilizado para avaliar a capacidade de passagem do betão através de espaços estreitos.

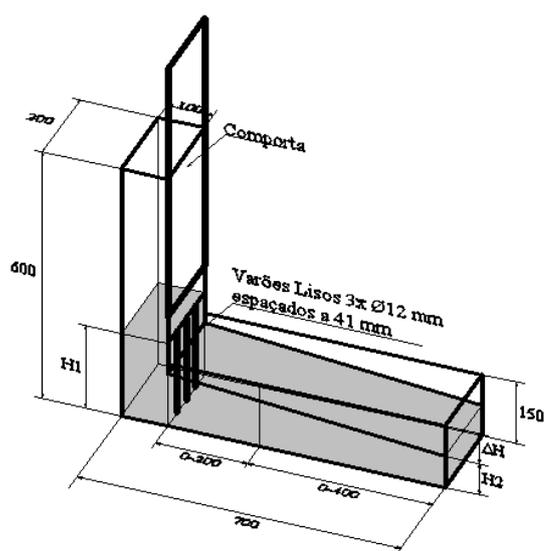


Figura 4.3 - Dimensões geométricas da caixa L (unidades em mm)



Figura 4.4 - Ensaio da caixa L

4.2.2.2 Análise de Resultados

Realizou-se um ensaio na caixa L por cada amassadura, num total de dois ensaios por cada composição. No Quadro 4.2, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios na caixa L.

Quadro 4.2 - Valores médios de dois ensaios da caixa L

	H₂/H₁	T₂₀₀ (s)	T₄₀₀ (s)
BAC	0.88	2.50	5.31
BACRFA	0.81	5.34	10.06

Segundo a EFNARC (2002), para se garantir um escoamento sem bloqueio é necessário que $T_{200} < 1$ s, $T_{400} < 2$ s e $H_2/H_1 > 0.8$.

De acordo com os resultados apresentados no Quadro 4.2, embora T_{200} e T_{400} apresentem valores superiores aos indicados pela EFNARC (2002), verifica-se pelo coeficiente de bloqueio, que ambos os betões garantem um escoamento sem bloqueio. Deste modo, pode-se concluir que a adição das fibras de aço ao BAC na percentagem utilizada (60 Kg/m^3), apesar de aumentar o valor dos parâmetros em análise, não compromete o escoamento sem bloqueio.

4.2.3 Ensaio de fluidez (“V-funnel test”)

4.2.3.1 Descrição do ensaio

Este ensaio permite avaliar a capacidade do betão em passar por uma abertura estreita, medindo-se desta forma a capacidade de escoamento. Para além disso, consegue-se, igualmente, verificar a resistência à segregação que a mistura de betão apresenta, a partir da avaliação do tempo de escoamento. A norma de referência usada neste ensaio foi a NP EN 12350-9 (2010).

Para a realização do ensaio utilizou-se um funil em formato de “V” com faces planas e uma comporta na base do funil (Figura 4.5).

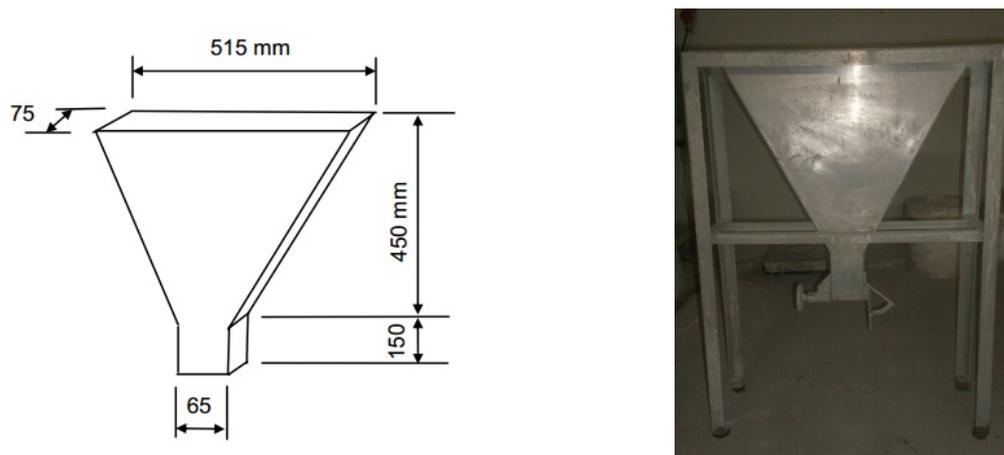


Figura 4.5 - Geometria do Funil V

O procedimento deste ensaio consiste em encher o funil com cerca de 10 litros de betão, de forma contínua e sem compactar. Após nivelamento do betão colocado, retira-se a tampa inferior do funil, deixando o betão fluir. Regista-se o tempo T_0 medido desde o início da abertura da comporta e até que surja luz no interior do funil proveniente do orifício de escoamento. O tempo de fluidez, T_0 , fornece alguma informação relativa à viscosidade da amassadura e da sua segregação.

4.2.3.2 Análise de Resultados

Realizou-se um ensaio de fluidez por cada amassadura de BAC, num total de dois ensaios para esta composição. No caso do BACRFA apenas foi possível realizar um ensaio de fluidez no total. No Quadro 4.3, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de fluidez.

Quadro 4.3 - Valores médios de dois ensaios de fluidez

	T_0 (s)
BAC	28.09
BACRFA	106.07

De acordo com a EFNARC, para que o betão seja considerado auto-compactável, o valor T_0 deverá ser próximo dos 10 segundos. Tempos superiores ou inferiores, referem uma menor ou maior capacidade de escoamento do betão em estudo.

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que o BAC obteve um valor de T_0 superior a 10 segundos, o que significa possuir uma menor capacidade de escoamento. No caso do

BACRFA, apenas foi possível determinar para uma das amassaduras, visto que as fibras de aço tenderam a acumularem-se no orifício de escoamento, impedindo que o betão fluísse. Assim, podemos concluir que, para este ensaio, as dimensões do orifício de escoamento do funil não são adequadas para avaliar a capacidade de escoamento do BRFA.

4.2.4 Teor de ar

4.2.4.1 Descrição do ensaio

A determinação do teor de ar do betão fresco foi realizada por intermédio do método da pressão, utilizando um aerómetro (Figura 4.6) e de acordo com a norma NP EN 12350-7 (2009). O procedimento para a realização do ensaio consistiu em encher o recipiente com o betão, deixando a superfície completamente rasa. De seguida, fechou-se o aerómetro, fixando com os grampos o conjunto da tampa. Abriram-se as válvulas e introduziu-se água numa válvula, para preencher o restante volume do recipiente, até sair água na outra válvula. Fecharam-se ambas as válvulas e introduziu-se pressão na câmara superior com a bomba de ar, até que o ponteiro do manómetro alcançasse o traço do ponto zero do medidor de pressão. Esta pressão inicial bombeada para câmara antes do teste, serve para compensar a perda de volume de ar durante a medição do teor de ar do betão, que faz parte do próprio funcionamento do aerómetro definido pelo fabricante. Para iniciar o teste e medir o teor de ar do betão, ativou-se a válvula de descarga de ar e leu-se no mostrador a percentagem de ar contida no interior do betão.



Figura 4.6 - Aerómetro para betão

Com a determinação do volume de vazios pode-se avaliar o desempenho dos betões em estudo, em termos de durabilidade e resistência mecânica, uma vez que quanto menor for o volume de vazios contido na amassadura, maior a compactidade da mistura em fase de produção e conseqüentemente, melhor a qualidade e o desempenho dos betões em estado endurecido.

4.2.4.2 Análise de Resultados

Determinou-se o teor de ar em cada amassadura realizada, por cada composição em estudo. No Quadro 4.4, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de determinação do teor de ar do betão fresco.

Quadro 4.4 - Valores médios de dois ensaios de determinação do teor de ar

	Teor de ar (%)
BAC	0.83
BACRFA	0.80

Os teores de ar obtidos para os betões frescos são bastante reduzidos, muito provavelmente devido à utilização de elevada quantidade de finos e à qualidade dos agregados utilizados. Verifica-se que a adição de fibras de aço ao BAC não alterou o teor de ar no betão fresco, provavelmente devido à auto-compactibilidade do betão.

4.2.5 Massa volúmica no estado fresco

4.2.5.1 Descrição do ensaio

A determinação da massa volúmica do betão fresco foi realizada de acordo com as recomendações da norma NP EN 12350-6 (2009). O procedimento do ensaio consistiu em utilizar o recipiente do aerómetro, antes do ensaio de determinação do teor de ar (cujo volume conhecido, V , é de 8 litros), e procedeu-se à pesagem do recipiente vazio (m_1) e após enchimento com betão (m_2), antes de fechar o aerómetro com a tampa. A massa volúmica, D expressa em kg/m^3 é determinada através da equação (4.1).

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (4.1)$$

4.2.5.2 Análise de Resultados

Determinou-se a massa volúmica em cada amassadura no estado fresco, por cada composição em estudo. No Quadro 4.5 apresentam-se os resultados obtidos da determinação da massa volúmica no betão fresco.

Quadro 4.5 - Valores médios de dois ensaios de determinação da massa volúmica

	D (kg/m³)
BAC	2.38
BACRFA	2.40

Analisando os resultados obtidos, verifica-se que o BACRFA apresenta uma massa volúmica no estado fresco semelhante à obtida no BAC, o que significa que a adição de fibras de aço não afetou a massa volúmica do BAC, dado a relativa baixa percentagem de fibras de aço utilizadas na composição.

4.3 Características Mecânicas

O processo de caracterização mecânica do BAC e do BACRFA incluiu vários ensaios, nomeadamente, o ensaio de determinação do módulo de elasticidade, o ensaio de avaliação do comportamento em compressão e o ensaio de avaliação do comportamento à flexão.

Os ensaios de determinação do módulo de elasticidade e comportamento à compressão foram realizados recorrendo a provetes cilíndricos normalizados com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, conforme verificado no Quadro 3.11. As faces destes provetes cilíndricos foram previamente retificadas com equipamento apropriado, de forma a melhorar o contacto destas com os pratos de carga.

Os ensaios de comportamento à flexão foram realizados recorrendo a provetes prismáticos normalizados com 600 × 150 × 150 mm³ (Quadro 3.11).

4.3.1 Módulo de elasticidade secante em compressão

4.3.1.1 Descrição do ensaio

A determinação do módulo de elasticidade secante em compressão ou Módulo de Young, E_C , foi realizada segundo a pré norma europeia prEN 12390-13 (2012), cujo método consiste em submeter o provete cilíndrico em controlo de força a, pelo menos, 3 ciclos de carga/descarga. O método descrito na referida norma permite determinar dois módulos de elasticidade secante, o módulo inicial, $E_{C,0}$, medido no 1º carregamento e o módulo estabilizado, $E_{C,S}$, medido no 3º carregamento. Neste caso, optou-se por apenas determinar o módulo estabilizado, $E_{C,S}$.

A configuração do ensaio deve ter dois anéis posicionados no centro dos provetes, distanciados 100 mm entre si. No anel superior são colocados três transdutores de deslocamentos (LVDTs – *Linear Variation Displacement Transducer*), dispostos no anel simetricamente formando ângulo de 120º entre si, conforme representado na Figura 4.7. A deformação obtém-se a partir dos três LVDTs, registando-se os deslocamentos entre os referidos anéis. Esta disposição evita que a deformação do equipamento de ensaio seja adicionada aos valores lidos pelos LVDTs.



Figura 4.7 - Configuração do ensaio para determinação do módulo de elasticidade

A determinação do módulo de elasticidade foi realizada em 3 provetes de cada tipo de betão, BAC e BACRFA, às idades de 7, 28 e 90 dias.

Previamente ao ensaio de determinação do módulo de elasticidade, procedeu-se à realização de um ensaio de compressão direta, de acordo com a norma NP EN 12390-3 (2011), num dos provetes cilíndricos de cada tipo de betão e a cada idade em estudo. O valor máximo obtido da resistência à compressão, f_c , foi utilizado para definir o nível de tensão dos ciclos carga/descarga a realizar na determinação do módulo de elasticidade.

No início do ensaio de determinação do módulo de elasticidade foi aplicada uma tensão de 0.5MPa (σ_p). Posteriormente, aumentou-se a força de forma contínua, a uma velocidade de 0.6 ± 0.2 MPa/s até se alcançar 1/3 da tensão máxima ($\sigma_a = f_c/3$). Esta carga foi mantida durante 20 ± 2 s. Seguiu-se um ramo de descarga, à mesma velocidade com que se efetuou o carregamento, até se ter atingido 1/9 da tensão máxima ($\sigma_b = f_c/9$) e manteve-se esta carga novamente durante 20 ± 2 s. De seguida, deu-se início a novo ciclo, do mesmo modo, até perfazer 3 ciclos (Figura 4.8). No 3º ciclo, os últimos 10s enquanto a σ_a é mantida foram destinados para efetuar a leitura da extensão $\varepsilon_{a,3}$ e no 2º ciclo, os últimos 10s quando a σ_b é mantida são destinados para efetuar as leituras da extensão $\varepsilon_{b,2}$. O módulo de elasticidade secante estabilizado, $E_{C,S}$ é definido por:

$$E_{C,S} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_S} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{b,2}} \quad (4.2)$$

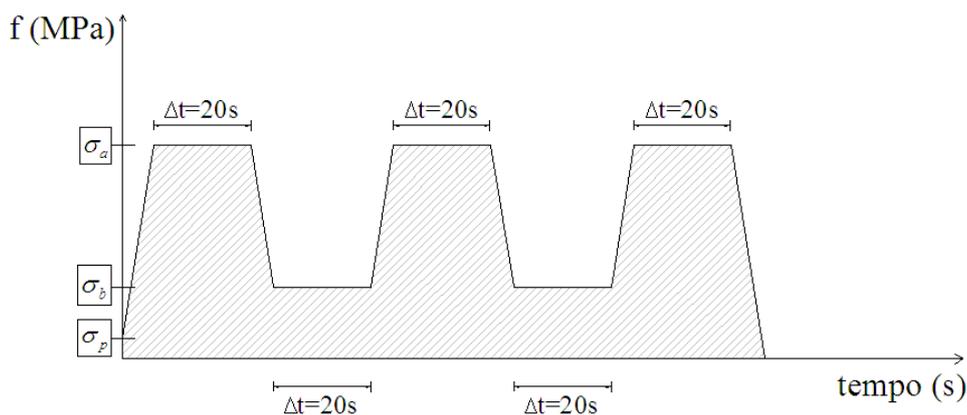


Figura 4.8 - Representação dos ciclos de carga/descarga para determinação do módulo de elasticidade

Após a determinação do módulo de elasticidade, os mesmos provetes foram utilizados para os ensaios de avaliação da resposta à compressão.

4.3.1.2 Análise de Resultados

No Quadro 4.6 são apresentados os valores médios obtidos do módulo de elasticidade do BAC e do BACRFA às diferentes idades, bem como os respetivos desvios padrão e coeficientes de variação.

Quadro 4.6 - Valores médios de quatro ensaios de determinação do módulo de elasticidade

Idade (dias)	BAC			BACRFA		
	7	28	90	7	28	90
E_{cm} (GPa)	31.16	35.79	36.65	31.58	36.88	37.80
Desvio Padrão	2.68	0.42	2.55	2.41	2.48	2.41
Coefficiente de variação (%)	8.62	1.16	6.96	7.62	6.71	6.38

No gráfico da Figura 4.9 apresenta-se a evolução do módulo de elasticidade médio dos provetes de BAC e de BACRFA com a idade, obtida experimentalmente. Apresenta-se também a evolução do módulo de elasticidade, prevista pelo Eurocódigo 2 para betões convencionais, considerando como referência o valor de E_{cm} do BAC e do BACRFA, obtido experimentalmente aos 28 dias.

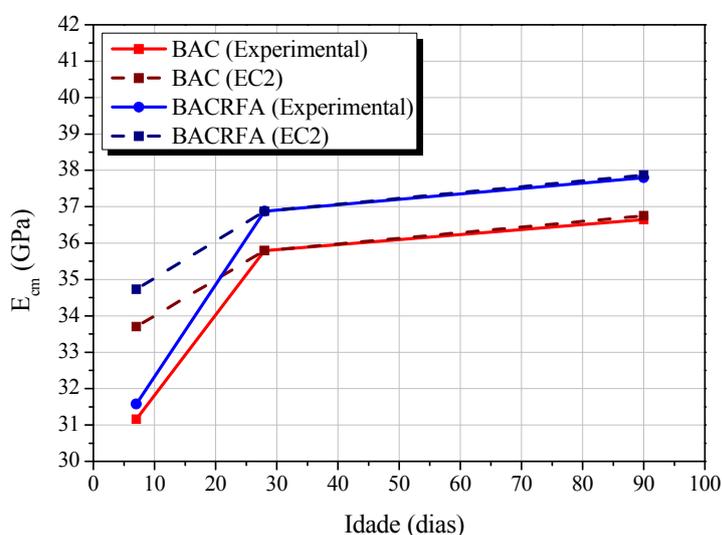


Figura 4.9 - Variação do módulo de elasticidade com a idade, do BAC e do BACRFA, obtida experimentalmente e do betão convencional prevista pelo Eurocódigo 2

Conforme se observa, verifica-se que o BACRFA apresenta valores de módulo de elasticidade ligeiramente superiores aos determinados no BAC. A evolução do módulo de elasticidade é mais pronunciada até aos 28 dias de idade, a partir da qual o aumento de E_{cm} é menos

acentuado. Comparando os resultados obtidos experimentalmente com os previstos pelo Eurocódigo 2, verifica-se que o módulo de elasticidade do betão convencional é mais elevado, cerca de 10%, nas primeiras idades (dos 7 aos 28 dias), do que o do BAC e do BACRFA, provavelmente devido à elevada incorporação de material ultra-fino. No entanto, a partir dos 28 dias de idade, não se observam diferenças entre os módulos de elasticidade, obtidos experimentalmente no BAC e no BACRFA e os previstos pelo Eurocódigo 2 no betão convencional.

4.3.2 Comportamento em compressão

4.3.2.1 Descrição do ensaio

A resposta à compressão foi avaliada numa prensa servo-controlada constituída por um grupo hidráulico, um atuador com 2250 kN de capacidade máxima de carga, um transdutor interno e um software para controlo do ensaio, conforme representado na Figura 4.10. A realização destes ensaios consistiu na aplicação de um procedimento linear de carga sobre o provete, sob controlo de deslocamento do transdutor interno e a uma velocidade de 5 $\mu\text{m/s}$.

Com base nos valores registados pelo transdutor interno, determinou-se a relação tensão-extensão de compressão ($\sigma_c - \varepsilon_c$) para cada provete. De acordo com a norma NP EN 12390-3 (2011), a tensão de compressão, σ_c é a relação entre a força aplicada pelo atuador e a secção transversal do provete, correspondente à área de contacto do atuador com o provete. A extensão, ε_c é a relação entre o deslocamento do eixo do provete e a altura inicial do provete.

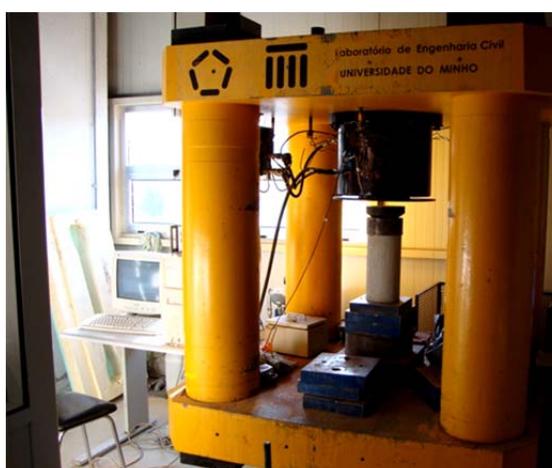


Figura 4.10 - Bastidor de ensaios de compressão uniaxial utilizado nos ensaios de resistência à compressão dos provetes cilíndricos

4.3.2.2 Análise de Resultados

Na Figura 4.11 apresentam-se as curvas médias tensão-extensão de compressão de quatro provetes de BAC e de BACRFA, aos 7, 28 e 90 dias de idade.

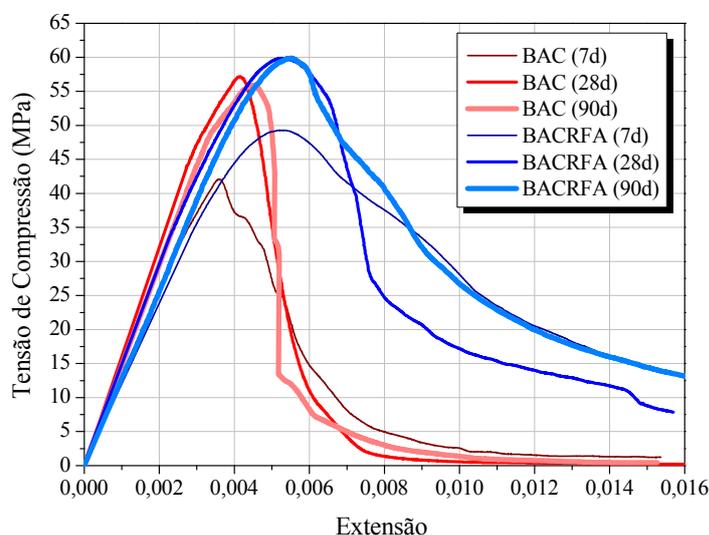


Figura 4.11 - Relação média da tensão - extensão em compressão de quatro respostas obtidas do BAC e do BACRFA, aos 7, 28 e 90 dias de idade

No Quadro 4.7 são apresentados os valores médios obtidos da resistência à compressão do BAC e do BACRFA às diferentes idades, bem como os respetivos desvios padrão e coeficientes de variação.

Quadro 4.7 - Resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão

Idade (dias)	BAC			BACRFA		
	7	28	90	7	28	90
f_{cm} (MPa)	43.23	60.28	63.85	50.17	61.90	66.13
Desvio Padrão	3.58	0.77	1.31	3.47	3.92	6.61
Coefficiente de variação (%)	8.29	1.27	2.05	6.92	6.34	9.99

No gráfico da Figura 4.12 apresenta-se a evolução da resistência à compressão média dos provetes de BAC e de BACRFA com a idade, obtida experimentalmente. Apresenta-se também a evolução da resistência à compressão, prevista pelo Eurocódigo 2 para betões convencionais, considerando como referência o valor de f_{cm} do BAC e do BACRFA, obtido experimentalmente aos 28 dias.

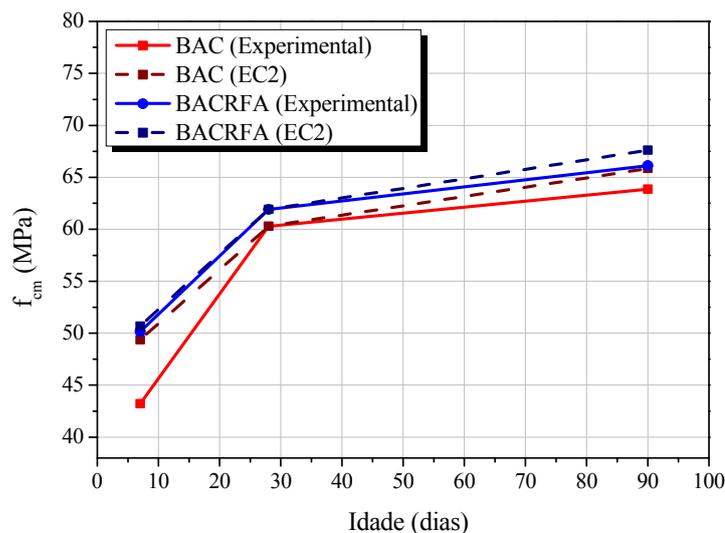


Figura 4.12 - Variação da resistência à compressão com a idade, do BAC e do BACRFA, obtida experimentalmente e do betão convencional prevista pelo Eurocódigo 2

A análise das Figuras 4.11 e 4.12 e do Quadro 4.7 permite verificar que o BACRFA apresentou mais resistência de compressão e maior resistência pós pico, o que significa maior capacidade de absorção de energia por unidade de volume de material.

Comparando os resultados obtidos experimentalmente com os previstos pelo Eurocódigo 2, verifica-se que as diferenças entre a resistência à compressão do BAC e do BACRFA e a do betão convencional prevista pelo Eurocódigo 2, são pouco significativas.

As Figuras 4.13 e 4.14 apresentam os modos de rotura dos provetes cilíndricos depois da realização do ensaio de compressão.



Figura 4.13 - Modos de rotura em compressão típicos dos provetes de BAC

No caso dos provetes de BAC, após o pico de carga, as camadas laterais da zona central do provete destacaram-se e a capacidade de carga passou a ser garantida fundamentalmente pelo contacto entre a extremidade do provete e pelo atrito entre as superfícies de rotura.



Figura 4.14 - Modos de rotura em compressão típicos dos provetes de BACRFA

Por outro lado, nos provetes de BACRFA, após o pico de carga desenvolveram-se fendas longitudinais na zona central do provete, provocadas por um esforço de tração localizado. As fendas são como que “cozidas” pelas fibras, que impedem que a fenda se expanda, evitando assim a desagregação completa do material.

4.3.3 Comportamento em flexão

4.3.3.1 Descrição do ensaio

O comportamento em flexão dos betões produzidos foi avaliado através de ensaios de flexão realizados em conformidade com as recomendações da RILEM TC 162-TDF (2003) e do CEB-FIP MODEL CODE (2010). Os ensaios de flexão, foram realizados em provetes prismáticos, com dimensões de $600 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$, com um entalhe a meio-vão e submetido a três pontos de carga. Foram ensaiadas 4 vigas por cada idade do provete em estudo. O entalhe a meio vão foi realizado numa das faces paralela à direção de betonagem e sua profundidade e espessura foram de 25 e 5 mm, respetivamente. Os provetes foram colocados sobre apoios de roletes, com um vão livre de 500 mm.

Os ensaios foram realizados numa prensa servo-controlada de elevada precisão, em controlo de deslocamento através de um transdutor (LVDT) posicionado a meio vão, com uma

velocidade de deformação de 0.2 mm/min. A carga aplicada foi medida com recurso a uma célula de carga de 100 kN de capacidade, e o deslocamento vertical a meio vão foi medido por intermédio de um LVDT (com ± 5 mm de campo), fixo a uma barra metálica horizontal apoiada em dois pontos fixos do provete (a 25 mm de cada face lateral de extremidade). Em torno de um desses pontos de apoio a barra pode rodar, e num dos apoios pode ainda deslizar horizontalmente, garantindo-se as condições para não serem registados deslocamentos parasitas nos referidos transdutores (Figura 4.15a). No caso das vigas de BACRFA foi também medida a abertura de fissura na boca do entalhe (CMOD – *crack mouth opening displacement*) através de um outro transdutor posicionado perpendicularmente à boca do entalhe (Figura 4.15b). O sistema de ensaio apresenta-se representado nas Figuras 4.15a e 4.15b, onde está patente o esquema de aplicação de carga e a disposição dos transdutores.



Figura 4.15 - Aplicação da carga e posicionamento dos transdutores

Relativamente às relações típicas que se obtêm nos ensaios de flexão de BACRFA, estão representados na Figura 4.16 os diagramas tipo força vs. flecha obtidos através de um ensaio de flexão de três pontos de carga.

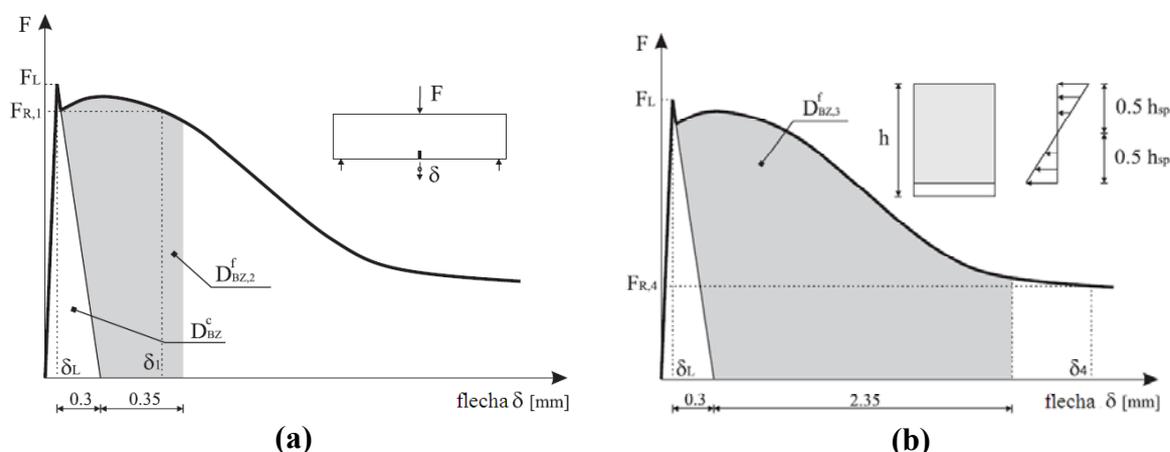


Figura 4.16 - Diagramas força vs. flecha (adaptado de Cunha, 2010, RILEM TC 162-TDF, 2003)

Na Figura 4.17 encontra-se representado o diagrama tipo força vs. CMOD, também obtido através de um ensaio de flexão de três pontos de carga.

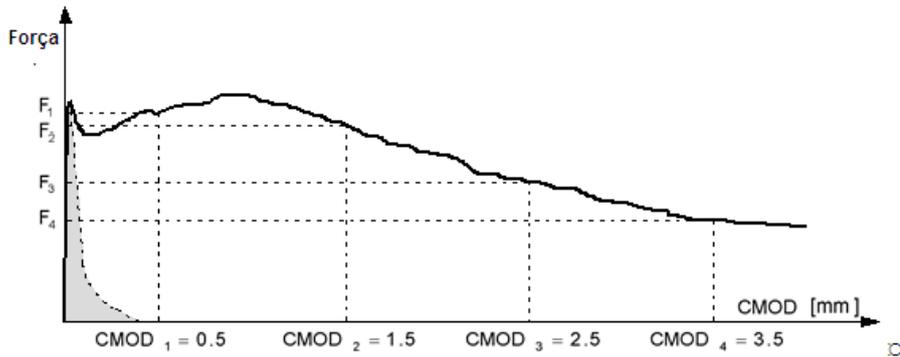


Figura 4.17 - Diagrama força vs. CMOD (CEB-FIP MODEL CODE, 2010)

Através destas relações força vs. flecha e força vs. CMOD pode-se determinar a força de limite de proporcionalidade (F_L) correspondente ao valor máximo da força suportada pela viga em flexão até uma flecha, δ ou CMOD de 0.05 mm.

Admitindo a distribuição de tensões representada na Figura 4.16b (regime estático e secção não fendilhada), a resistência à tração por flexão (ou tensão correspondente ao limite de proporcionalidade), $f_{ct,L}$, obtém-se da seguinte equação:

$$f_{ct,L} = \frac{3F_L L}{2bh_{sp}^2} \quad (4.3)$$

em que,

L - Comprimento do vão do provete;

b - Largura do provete;

h_{sp} - Altura útil do provete (distância da extremidade superior do entalhe à superfície).

A contribuição da adição das fibras no betão, em termos de capacidade de absorção de energia, $D_{BZ,2}^f$ e $D_{BZ,3}^f$, pode ser avaliada através da medição da área sob a curva força-flecha até dois limites de flecha, $\delta_2 (= \delta_L + 0.65mm)$ e $\delta_3 (= \delta_L + 2.65mm)$, sendo constituída por duas partes, uma correspondente à contribuição do betão simples, D_{BZ}^c , e outra à das fibras, $D_{BZ,2}^f$ e $D_{BZ,3}^f$. Admitindo uma distribuição linear de tensões na secção de fratura (plano de simetria da viga) e desprezando a parcela de energia afeta à fratura do betão simples, as resistências

equivalentes à tração por flexão, $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ podem ser determinadas por meio das equações (4.4) e (4.5).

$$f_{eq,2} = \frac{3}{2} \left(\frac{D_{BZ,2}^f}{0.50} \right) \frac{L}{bh_{sp}^2} \quad (4.4)$$

$$f_{eq,3} = \frac{3}{2} \left(\frac{D_{BZ,3}^f}{2.50} \right) \frac{L}{bh_{sp}^2} \quad (4.5)$$

Os parâmetros $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$ estão relacionados com a capacidade de absorção de energia do betão até às flechas δ_2 e δ_3 , respetivamente, sendo utilizados na simulação do comportamento do material à tração, nas verificações aos estados limites de utilização ($f_{eq,2}$) e último ($f_{eq,3}$) (Vandewalle *et al.*, 2000).

Com base nos valores de $CMOD_j$ ($i=1$ a 4), indicados na Figura 4.17, e nos correspondentes valores de força F_i ($i=1$ a 4), são determinados os parâmetros da resistência residual à tração por flexão $f_{R,i}$, através da seguinte expressão:

$$f_{R,i} = \frac{3F_iL}{2bh_{sp}^2} \quad (4.6)$$

4.3.3.2 Análise de Resultados

Nas Figuras 4.18, 4.19, 4.20, 4.21 e 4.22 apresentam-se as curvas médias força-flecha registadas nos ensaios de flexão com provetes de BAC e de BACRFA aos 7, 28 e 90 dias de idade.

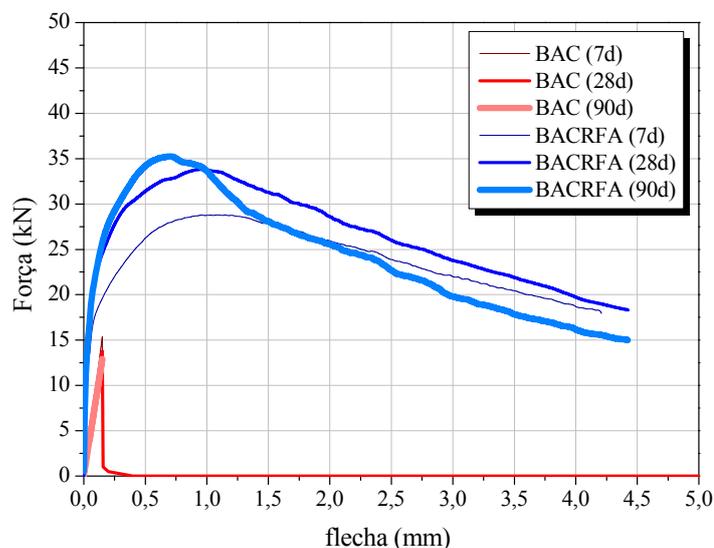


Figura 4.18 - Relação força - flecha do BAC e BACRFA

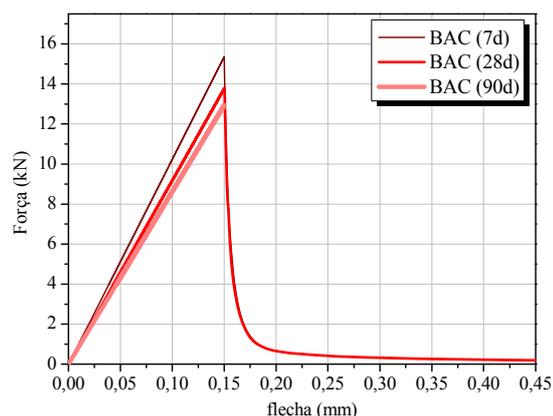


Figura 4.19 - Relação força - flecha do BAC a diferentes idades

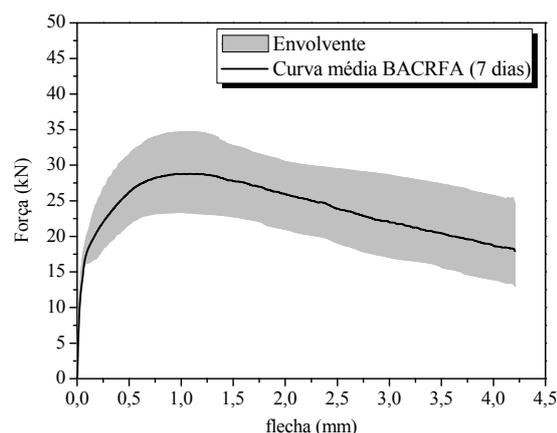


Figura 4.20 - Relação força - flecha do BACFRA a 7 dias

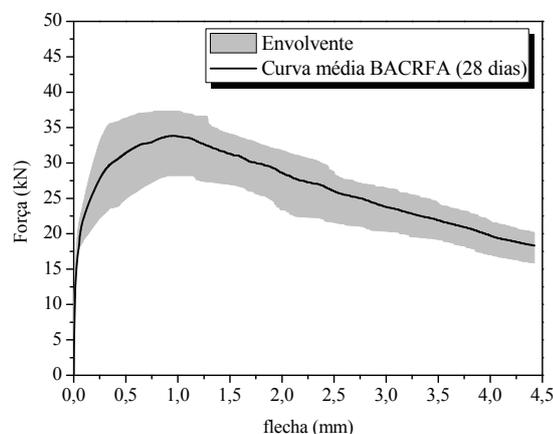


Figura 4.21 - Relação força - flecha do BACFRA a 28 dias

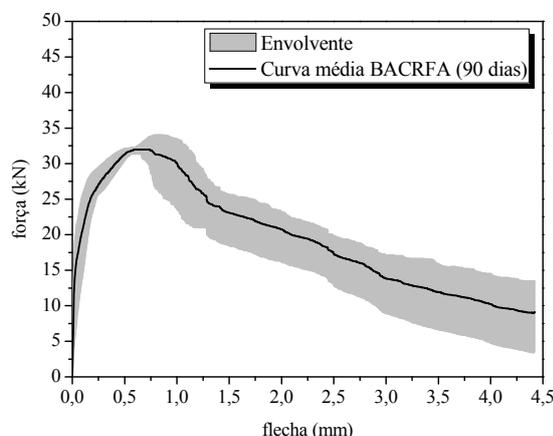


Figura 4.22 - Relação força - flecha do BACFRA a 90 dias

Nos Quadros 4.8 e 4.9 e na Figura 4.23 apresentam-se os resultados obtidos das resistências equivalentes e residuais, determinadas de acordo com a RILEM TC 162 TDF (2003) e o CEB-FIP MODEL CODE (2010).

Quadro 4.8 - Resistências equivalentes e residuais de acordo com a RILEM para o BACRFA

		$f_{ct,L}$	$f_{eq,2}$	$f_{eq,3}$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
7 dias	Média (MPa)	5.094	8.337	8.512	8.247	9.138	8.122	7.085
	Desvio Padrão	0.268	1.691	1.652	1.567	1.724	1.464	1.934
	CoV (%)	5.27	20.28	19.41	19.00	18.86	18.02	27.29
28 dias	Média (MPa)	6.389	10.122	9.721	9.915	10.296	8.834	7.629
	Desvio Padrão	0.484	1.997	1.482	1.920	1.306	1.433	0.994
	CoV (%)	7.58	19.73	15.25	19.37	12.69	16.23	13.03
90 dias	Média (MPa)	7.008	10.105	7.944	9.822	10.315	8.832	7.546
	Desvio Padrão	0.403	0.455	1.021	0.355	0.465	0.161	0.375
	CoV (%)	5.75	4.50	12.85	3.62	4.51	1.83	4.97

Quadro 4.9 - Resistências residuais de acordo com o CEB-FIP para o BACRFA

		$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
7 dias	Média (MPa)	8.390	8.898	7.608	6.561
	Desvio Padrão	1.532	1.540	1.521	1.978
	CoV (%)	18.26	17.30	20.00	30.14
28 dias	Média (MPa)	10.047	9.883	8.364	7.049
	Desvio Padrão	1.88	1.213	1.256	0.836
	CoV (%)	18.72	12.28	15.02	11.86
90 dias	Média (MPa)	9.991	9.932	8.249	6.904
	Desvio Padrão	1.876	1.296	1.220	1.405
	CoV (%)	18.78	13.04	14.78	20.35

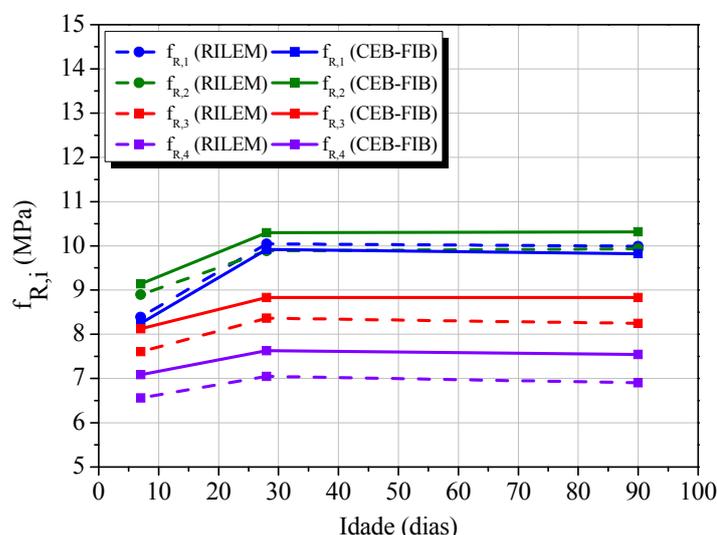


Figura 4.23 - Variação dos valores da resistência residual à tração por flexão com a idade para o BACRFA

Da análise dos gráficos presentes, nas Figuras 4.18 e 4.19 é possível verificar que após ser atingido o ponto de carga máxima suportado pelas vigas de BAC, estas apresentaram todas uma diminuição abrupta da capacidade de carga, devido ao seu comportamento frágil. No caso das vigas de BACRFA (Figuras 4.20, 4.21 e 4.22) é claro o aumento de ductilidade proporcionado pela incorporação das fibras. Nestes provetes desenvolveu-se, em geral, uma única macrofenda acima do entalhe e, relativamente ao modo de rotura, a maioria das fibras cederam por arrancamento e as suas extremidades dobradas apresentavam-se retificadas em percentagem significativa.

Pelos Quadros 4.8 e 4.9 é facilmente identificável a ductilidade conferida pela adição das fibras. Os resultados obtidos mostram que os valores de resistências equivalentes aumentaram dos 7 para os 28 dias, mas permaneceram praticamente invariáveis após essa data.

Comparando os resultados das resistências residuais, calculados de acordo com a RILEM e o CEB-FIP (Figura 4.23), verifica-se que a diferença é pouco significativa. No entanto, obtiveram-se resistências residuais mais elevadas pelo CEB-FIP, do que pela RILEM.

4.4 Ensaio de durabilidade

Com o objetivo de caracterizar os betões sob o ponto de vista da durabilidade, foram avaliados alguns parâmetros indicadores de durabilidade de utilização corrente em betões convencionais, nomeadamente, a absorção de água por imersão e por capilaridade, a permeabilidade ao ar e à água, a resistividade elétrica, a difusão de cloretos por migração em regime não estacionário, a resistência à penetração de cloretos por imersão e a carbonatação.

A normalização e regulamentação aplicável aos principais indicadores de durabilidade relevantes para o betão estão enquadradas segundo a NP EN 206-1 (2007). No entanto, esta norma não se aplica em toda a sua plenitude ao BRFA.

Os ensaios de avaliação da durabilidade foram realizados em provetes de BAC e de BACRFA com 28 dias de idade (cura realizada em imersão em água - Figura 3.13) e com as dimensões requeridas nas normas aplicáveis.

4.4.1 Absorção de água por imersão (pressão atmosférica)

A penetração de água para o interior do betão constitui um dos principais fatores que afeta a durabilidade das estruturas de betão armado. A sua ação nos mecanismos de deterioração que envolvem a corrosão das armaduras desenvolve-se quer ao nível da fase inicial constituindo um veículo de transporte das diversas substâncias agressivas, como por exemplo os cloretos, quer ao nível da fase de corrosão com o fornecimento da humidade necessária para alimentar o mecanismo de corrosão e baixando a resistividade do betão.

Controlar a permeabilidade e a absorção de água do betão constitui assim o principal objetivo para a execução de estruturas duráveis, pois betões de elevada durabilidade são caracterizados por apresentar valores baixos de permeabilidade e de absorção de água.

O ensaio de absorção de água por imersão está relacionado com a porosidade aberta, pois a água absorvida irá ocupar os poros acessíveis.

O ingresso de gases, água ou iões em solução aquosa no betão dá-se através dos poros na matriz da pasta de cimento ou através das micro-fissuras. A estrutura porosa do betão deve-se, principalmente, a cinco situações: ao excesso de água empregue na amassadura, para além da necessária para a hidratação, que evapora deixando vazios no seu lugar; à parte do ar emulsionado com os componentes, que fica retido durante a amassadura; ao facto de os agregados apresentarem determinado índice de porosidade; aos vazios existentes no próprio gel (microporos ou poros do gel) durante a fase de hidratação do cimento e aos poros de retração do betão (Ferreira, 2000).

Outro fator que influencia a permeabilidade é o diâmetro dos poros. Quando os diâmetros são reduzidos o material tem uma elevada capilaridade e uma permeabilidade reduzida e, inversamente, quando os diâmetros são grandes a capilaridade é reduzida e a permeabilidade elevada. Como a permeabilidade depende diretamente da porosidade aberta, é possível associar este parâmetro à razão A/C. O aumento da razão A/C provoca um aumento exponencial do coeficiente de permeabilidade devido ao aumento da porosidade.

4.4.1.1 Descrição do ensaio

O ensaio de absorção de água por imersão foi realizado em provetes cúbicos de 100 mm de aresta de BAC e de BACRFA, com base na especificação do LNEC E394 (1993).

O procedimento do ensaio consistiu em colocar 6 provetes (3 de BAC e 3 de BACRFA) numa estufa ventilada a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ até massa constante, M_1 . Considerou-se alcançada a massa constante do provete seco quando a diferença entre duas pesagens (intervaladas de 24 horas) foi inferior a 0.1% da média das duas leituras M_1 . Após alcançada massa seca constante, colocou-se cada provete imerso em água potável a $20 \pm 3^\circ\text{C}$ até ser alcançada massa constante, M_2 . A imersão do provete na água realizou-se por etapas, de tal modo que o provete fosse imerso sucessivamente, em intervalos de 1 hora, a 1/3 da sua altura, 2/3 da sua altura e na totalidade da sua altura, não ultrapassando o nível final da água 20 mm da face superior do provete imerso (Figura 4.24). Considerou-se alcançada a massa constante do provete saturado quando a diferença entre duas pesagens (intervaladas de 24 horas) foi inferior a 0.1% da média das duas leituras M_2 . Antes da pesagem de cada provete, foi removida a respetiva água superficial com um pano húmido. Após alcançada a massa constante dos provetes saturados, pesaram-se os provetes dentro da água de modo a obter a massa hidrostática de cada provete M_3 .



Figura 4.24 - Recipiente onde se realizaram os ensaios de absorção de água por imersão

A absorção de água por imersão, A_i , foi determinada pela diferença entre a massa do betão endurecido imerso em água e a massa do mesmo provete quando seco, expressa em termos do volume aparente do provete. O valor é expresso em percentagem e é dado pela seguinte expressão:

$$A_i(\%) = \frac{(M_2 - M_1)}{(M_2 - M_3)} \times 100 \quad (4.7)$$

em que,

M_1 - Massa constante do provete seco na estufa;

M_2 - Massa constante do provete saturado;

M_3 - Massa hidrostática do provete saturado.

4.4.1.2 Análise de Resultados

No Quadro 4.10 e na Figura 4.25 apresentam-se os resultados da absorção média de água por imersão à pressão atmosférica dos provetes de BAC e de BACRFA.

Quadro 4.10 - Resultados do ensaio de absorção de água por imersão

Betão	Provete	M_1 (g)	M_2 (g)	M_3 (g)	A_i (%)	A_{im} (%)	S_d (%)	CoV (%)
BAC	P1	2298.35	2400.05	1408.45	10.26	10.66	0.45	1.65
	P2	2268.16	2372.00	1389.26	10.57			
	P3	2348.42	2462.01	1442.82	11.15			
BACRFA	P1	2217.55	2322.24	1374.23	11.04	11.25	0.19	4.63
	P2	2361.07	2476.77	1462.50	11.41			
	P3	2295.26	2405.99	1425.00	11.29			

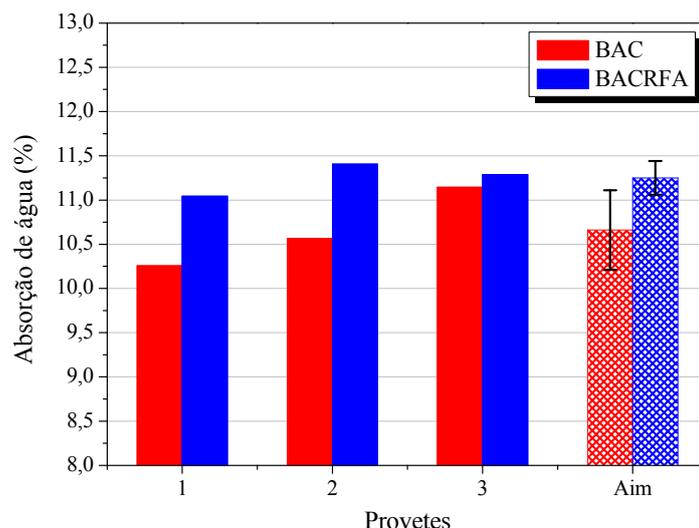


Figura 4.25 - Valores médios da absorção de água por imersão

Os resultados obtidos permitem confirmar o bom comportamento do betão auto-compactável quando comparado com o betão corrente, o qual poderá atingir valores neste ensaio até 20% (Ferreira, 2000).

Da análise dos valores apresentados, verifica-se que, em média, a adição de fibras de aço ao betão originou um aumento da absorção de água por imersão de 5.6%. Esta variação é pouco significativa podendo-se concluir que a adição de fibras não provocou um aumento significativo da porosidade aberta do betão. A dispersão dos resultados obtidos é reduzida, visto que os valores obtidos em ambas as composições foram próximos de 10 a 12%, o que poderá ser justificado pela microestrutura homogénea dos BAC e dos BACRFA no contexto de absorção de água.

Com os resultados obtidos podem-se calcular alguns parâmetros úteis, como sendo:

- Massa volúmica das partículas secas dada pela expressão: $\gamma_{s_1} = \frac{M_1}{M_3 - M_2}$ (4.8)

- Massa volúmica das partículas impermeáveis dada pela expressão: $\gamma_{s_2} = \frac{M_1}{M_1 - M_2}$ (4.9)

- Massa volúmica das partículas sólidas saturadas dada pela expressão: $\gamma_{s_3} = \frac{M_3}{M_3 - M_2}$ (4.10)

No Quadro 4.11 apresentam-se os valores médios obtidos destes parâmetros.

Quadro 4.11 - Massas volúmicas das partículas secas, impermeáveis e sólidas saturadas

Betão	γ_{s_1} (kN/m ³)	S _d (%)	CoV (%)	γ_{s_2} (kN/m ³)	S _d (%)	CoV (%)	γ_{s_3} (kN/m ³)	S _d (%)	CoV (%)
BAC	2.59	0.01	0.26	2.31	0.01	0.30	2.42	0.00	0.14
BACRFA	2.63	0.01	0.20	2.34	0.01	0.29	2.45	0.01	0.23

Pelos valores apresentados também é possível concluir que a adição de fibras não provoca um aumento significativo das massas volúmicas das partículas secas, impermeáveis e sólidas saturadas.

4.4.2 Absorção de água por capilaridade

Capilaridade define-se como sendo o transporte de líquidos nos poros sólidos devido à tensão superficial existente nos vasos capilares (Wilson *et al.*, 1999).

Os poros no betão quando entram em contacto com um líquido, este é absorvido pelas forças capilares presentes em cada poro, sendo esta força tanto maior quanto menor o diâmetro dos poros, apesar da velocidade de ingresso do líquido no betão ser menor (Ferreira, 2000).

O transporte do líquido é influenciado pela sua viscosidade, densidade e tensão superficial e pelas características do sólido, nomeadamente a estrutura dos poros e a energia superficial.

Uma vez que não é possível analisar os poros capilares individualmente, a capilaridade é analisada como um todo através de ensaios que medem a velocidade de absorção de água pelo betão não saturado e imerso numa altura de água, em geral, de 5±1 mm (Costeira, 2011).

A absorção capilar pode ser determinada a partir da proporcionalidade verificada entre o volume de água absorvida por unidade de área com a raiz quadrada do tempo (*t*), nas primeiras horas de ensaio (Ferreira, 2000), de acordo com a seguinte equação:

$$A_c = a_0 + S \cdot \sqrt{t} \quad (4.11)$$

em que,

A_c - Quantidade de água absorvida por unidade de área em contacto com a água, desde o início do ensaio (mg/mm²);

a_0 - Água absorvida inicialmente pelos poros na superfície de contacto (mg/mm²);

S - Coeficiente de absorção capilar (mm/min^{0.5}).

Conforme verificado na Figura 4.26, a cinética de absorção capilar não é linear. Na Fase 1, verifica-se uma maior inclinação, devido ao preenchimento com água dos capilares de maior diâmetro, o que permite o cálculo do coeficiente de absorção capilar, S . A Fase 2 reflete o preenchimento dos capilares mais finos, pelo que processa-se mais lentamente. A Fase 3 caracteriza-se por uma estabilização da quantidade de água absorvida. Deste modo, justifica-se que a caracterização da durabilidade dos betões recorrendo ao coeficiente de absorção capilar, seja determinado nas primeiras quatro horas de ensaio (Coutinho, 1998 e Costeira, 2011).

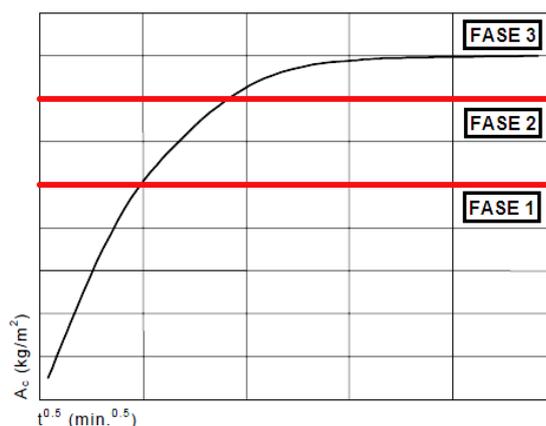


Figura 4.26 - Comportamento capilar em função do tempo (Camões, 2002)

Através deste ensaio poder-se-á também aferir a qualidade do betão, em função do coeficiente obtido de absorção capilar (Coutinho, 1998). Na Figura 4.27 é possível observar uma possível classificação do betão preconizada pela Taywood Engineering Ltd, baseada em ensaios com duração de 270 minutos.

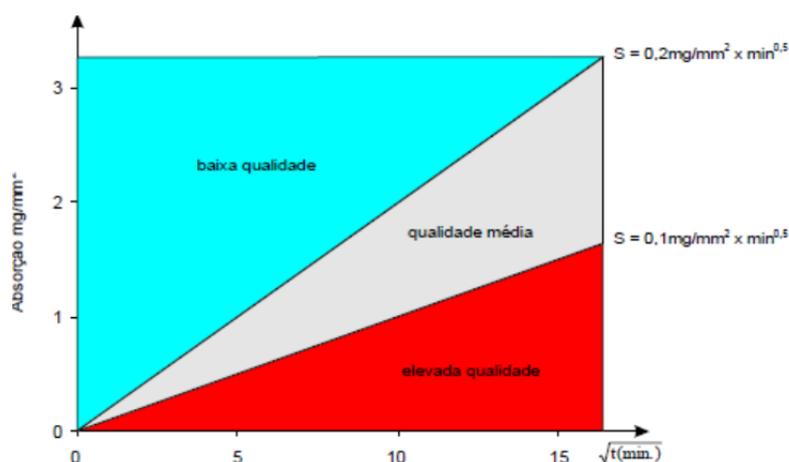


Figura 4.27 - Qualidade do betão em função do coeficiente de absorção S (Coutinho, 1998)

4.4.2.1 Descrição do ensaio

O presente ensaio foi realizado com base na especificação do LNEC E393 (1993) que descreve a determinação da absorção de água por capilaridade. Esta especificação prevê que a análise seja feita ao longo de 3 dias, com intervalos de pesagens compreendidos entre 3, 6, 24 e 72 horas. No entanto, como foi analisado na Figura 4.26, é durante as primeiras 4 horas que ocorre a maior absorção, pelo que foi definido realizar as pesagens dos provetes nas primeiras 4 horas, em intervalos de 1 hora, para se obter uma medição mais rigorosa do processo de absorção por capilaridade.

A absorção de água por capilaridade pode também ser aferida pela altura média da ascensão capilar medida perpendicularmente à face do provete que se encontra em contacto com a água. O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado em 3 provetes cúbicos de 100 mm de aresta de BAC e em 3 provetes de BACRFA de igual geometria.

O procedimento de ensaio consistiu em colocar os provetes numa estufa ventilada a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ até atingirem massa constante, M_0 . Considerou-se alcançada a massa constante do provete seco quando a diferença entre duas pesagens (intervaladas de 24 horas) foi inferior a 0.1% da média das duas leituras (M_0). Colocaram-se os provetes num recipiente e introduziu-se água até que o nível da mesma atingisse 5 ± 1 mm de altura, acima da face inferior do provete e tapou-se o recipiente (Figura 4.28). Conforme referido, efetuaram-se pesagens dos provetes nas primeiras 4 horas, desde a colocação da água, com intervalos de 1 hora e após este período inicial, efectuaram-se mais 3 a 4 pesagens por dia, até 3 dias de ensaio. Para efetuar as pesagens, retiraram-se os provetes do recipiente, deixou-se que a água escorresse e colocaram-se os mesmos sobre uma base não absorvente (vidro) durante 60 ± 5 segundos e realizou-se a pesagem de cada provete, M_i .



Figura 4.28 - Recipiente onde se realizaram os ensaios de absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade é determinada pelo aumento de massa do provete de betão endurecido, $M_i - M_0$, dividindo este valor pela área da face inferior do provete que esteve em contacto com a água. O valor vem expresso em mg/mm^2 , para cada raiz do tempo $\sqrt{t_i}$ e é dada pela seguinte expressão:

$$A_c = \frac{(M_i - M_0)}{(\Omega_i)} \quad (4.12)$$

sendo que,

M_0 - Massa do provete seco a $40 \pm 5^\circ\text{C}$;

M_i - Massa do provete em contacto com a água para os diferentes tempos de leitura ($\sqrt{t_i}$);

Ω_i - Área da face inferior do provete em contacto com a água.

Posteriormente, efetua-se o melhor ajuste de uma reta aos valores obtidos da absorção capilar, nas primeiras 4 horas do ensaio. O declive da reta corresponde ao coeficiente de absorção capilar.

4.4.2.2 Análise de Resultados

Os valores obtidos dos coeficientes de absorção capilar, S , foram de $0.0941 \text{ mg}/\text{mm}^2/\text{min}^{0.5}$ para o BACRFA e $0.1272 \text{ mg}/\text{mm}^2/\text{min}^{0.5}$ para o BAC. Os valores resultam da média dos ensaios realizados nos três provetes. Verifica-se que os coeficientes, em ambos os betões, são semelhantes, pelo que a presença das fibras (para a dosagem adotada) não provocou uma alteração substancial da porosidade capilar da superfície do BACRFA, de modo a facilitar a penetração de agentes deteriorantes das propriedades do BACRFA.

Nos Quadros 4.12 e 4.13 apresentam-se os resultados obtidos para a determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade, conseguidos através do ensaio realizado nos 3 provetes de cada composição. Nas Figuras 4.29 e 4.30 estão representadas as curvas que representam a cinética da absorção capilar, variação da quantidade de água absorvida por unidade de superfície em contacto com a água, em função da raiz quadrada do tempo.

Recorrendo à classificação preconizada pela Taywood Engineering Ltd (Figura 4.27), verifica-se que o BACRFA se classifica como um betão de elevada qualidade, enquanto o BAC como de qualidade média.

Quadro 4.12 - Resultados obtidos de A_c (mg/mm^2) no BAC

Tempo ($\text{min}^{0.5}$)	BAC						A_{cm} (mg/mm^2)
	Massa absorvida (mg)			A_c (mg/mm^2)			
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	
0.00	2366.37	2298.26	2361.86	0.000	0.000	0.000	0.000
7.75	2372.67	2309.2	2372.59	0.630	1.094	1.073	0.932
11.40	2375.25	2313.19	2377.35	0.888	1.493	1.549	1.310
13.78	2377.62	2317.4	2381.94	1.125	1.914	2.008	1.682
16.43	2380.19	2320.96	2385.38	1.382	2.270	2.352	2.001
18.44	2382.58	2324.03	2388.55	1.621	2.577	2.669	2.289
20.25	2384.16	2326.08	2390.67	1.779	2.782	2.881	2.481
21.45	2385.65	2327.89	2392.29	1.928	2.963	3.043	2.645
37.15	2404.44	2347.66	2412.18	3.807	4.94	5.032	4.593
37.95	2405.32	2348.72	2412.96	3.895	5.046	5.110	4.684
38.86	2406.65	2349.67	2414.02	4.028	5.141	5.216	4.795
39.81	2407.69	2350.4	2415.05	4.132	5.214	5.319	4.888
40.56	2408.47	2351.43	2415.92	4.210	5.317	5.406	4.978
41.35	2409.27	2352.54	2416.54	4.290	5.428	5.468	5.062
42.07	2410.35	2353.33	2417.59	4.398	5.507	5.573	5.159
42.72	2410.73	2353.9	2418.15	4.436	5.564	5.629	5.210
43.42	2411.31	2354.36	2418.68	4.494	5.610	5.682	5.262
53.67	2422.82	2364.92	2429.89	5.645	6.666	6.803	6.371
55.32	2424.25	2366.02	2430.97	5.788	6.776	6.911	6.492
56.39	2424.92	2366.81	2431.86	5.855	6.855	7.000	6.570
65.80	2433.15	2373.97	2440.22	6.678	7.571	7.571	7.362
67.04	2434.26	2374.83	2440.92	6.789	7.657	7.906	7.451
68.48	2435.07	2375.41	2441.93	6.870	7.715	8.007	7.531
76.94	2441.21	2380.34	2448.15	7.484	8.208	8.629	8.107
78.49	2441.99	2380.94	2448.61	7.562	8.268	8.675	8.168

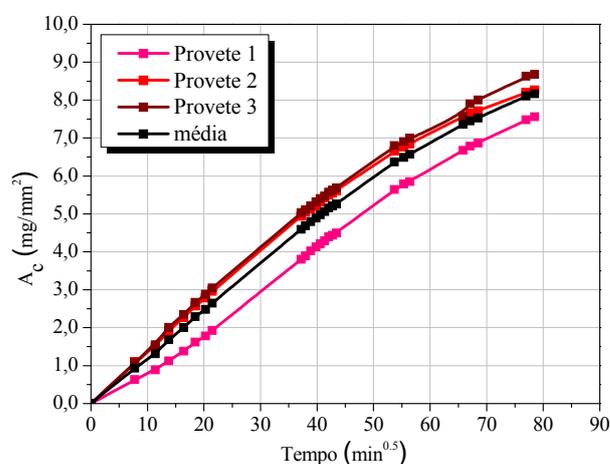


Figura 4.29 - Absorção capilar dos provetes de BAC

Quadro 4.13 - Resultados obtidos de A_c (mg/mm^2) no BACRFA

Tempo ($\text{min}^{0.5}$)	BACRFA						A_{cm} (mg/mm^2)
	Massa absorvida (mg)			A_c (mg/mm^2)			
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	
0.00	2248.33	2354.89	2375.15	0.000	0.000	0.000	0.000
7.75	2254.06	2360.34	2381.30	0.573	0.545	0.615	0.578
10.95	2257.49	2363.04	2383.96	0.916	0.815	0.881	0.871
13.42	2259.69	2365.34	2386.16	1.136	1.045	1.101	1.094
16.73	2262.14	2368.34	2389.38	1.381	1.345	1.423	1.383
19.75	2265.22	2371.47	2392.48	1.689	1.658	1.733	1.693
21.21	2266.84	2373.04	2394.19	1.851	1.815	1.904	1.857
35.50	2282.97	2389.46	2411.63	3.464	3.457	3.648	3.523
36.74	2284.52	2391.01	2413.18	3.619	3.612	3.803	3.678
37.82	2285.56	2392.01	2414.25	3.723	3.712	3.910	3.782
39.24	2286.09	2393.40	2415.61	3.776	3.851	4.046	3.891
41.35	2289.11	2395.43	2417.61	4.078	4.054	4.246	4.126
53.10	2301.31	2407.27	2429.08	5.298	5.238	5.393	5.310
55.32	2303.21	2408.93	2431.55	5.488	5.404	5.640	5.511
56.48	2304.19	2409.94	2432.42	5.586	5.505	5.727	5.606
64.69	2311.06	2416.39	2438.88	6.273	6.15	6.373	6.265
66.41	2312.27	2417.77	2440.06	6.394	6.288	6.491	6.391
74.81	2318.28	2423.31	2445.41	6.995	6.842	7.026	6.954
76.58	2319.36	2424.60	2446.86	7.103	6.971	7.171	7.082
78.23	2320.29	2425.20	2447.46	7.196	7.031	7.231	7.153

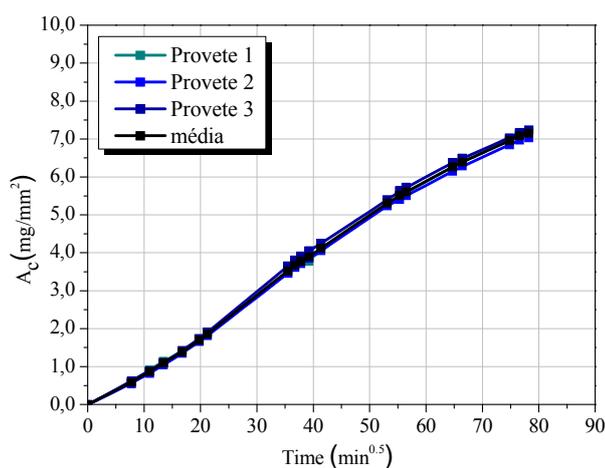


Figura 4.30 - Absorção capilar dos provetes de BACRFA

4.4.3 Permeabilidade ao ar e à água

A permeabilidade é o fluxo de gases ou líquidos através do betão e caracteriza-se pelo coeficiente de permeabilidade (Ferreira, 2000).

O transporte de gases, de água e de agentes agressivos dissolvidos no betão são aspetos importantes na avaliação da durabilidade do betão. A velocidade e o efeito do transporte são largamente influenciados pela estrutura porosa (quantidade, tamanho e distribuição dos poros), eventual fissuração existente e pelo meio ambiente ao qual a superfície do betão está exposta.

O fluxo de um fluido não compressível através de um provete, tal como a água, pode ser determinado de acordo com a lei de D'Arcy. No entanto, quando o fluido é compressível, como no caso dos gases, a lei de D'Arcy deve ser modificada para calcular o volume de gases a determinada pressão média no interior do provete de betão (Ferreira, 2000).

Para gases, o coeficiente de permeabilidade, K_G , é determinado de acordo com a equação (4.13), que considera a compressibilidade e a viscosidade do fluido.

$$K_G = \frac{2\nu \cdot \eta \cdot L \cdot P_2}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (4.13)$$

em que,

K_G - Coeficiente de permeabilidade do betão aos gases (m^2);

ν - Fluxo do gás (m^3/s);

η - Viscosidade dinâmica do gás (Ns/m^2);

L - Espessura da secção transversal do betão atravessada pelo gás (m);

A - Secção transversal do betão atravessada pelo gás (m^2);

P_1 - Pressão absoluta de entrada do gás (N/m^2);

P_2 - Pressão absoluta de saída do gás – pressão atmosférica (N/m^2).

Sabendo que a viscosidade do oxigénio a 20°C é de 2.02×10^{-16} Ns/m², a permeabilidade intrínseca do oxigénio pode ser calculada de acordo com a equação (4.14):

$$K_G = \frac{4.04v \cdot L \cdot 10^{-16}}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (4.14)$$

No caso da água, o coeficiente de permeabilidade depende do modo como é medido, visto que o caudal de água que atravessa o provete não é constante. No caso de a ação química da água dissolver o hidróxido de cálcio provoca um aumento da permeabilidade, e no caso da água ser incrustante e não o dissolver faz diminuir o referido coeficiente (Ferreira, 2000).

A pressão também influencia o coeficiente de permeabilidade visto que há determinados poros com certas dimensões que só abrem para determinadas pressões. A hidratação do cimento e a expansão da sua pasta dentro da água tem por efeito diminuir a permeabilidade (Ferreira, 2000).

O coeficiente de permeabilidade à água pode ser calculado através da equação de Valenta (Stanish *et al.*, 1997), por intermédio da medição da profundidade de penetração da água quando for atingido o fluxo estacionário através do provete. De acordo com a equação de Valenta, o coeficiente de permeabilidade à água, K_w , é determinado pela equação (4.15).

$$K_w = \frac{d_p^2 \cdot \delta}{2 \cdot t \cdot h} \quad (4.15)$$

em que,

K_w - Coeficiente de permeabilidade do betão à água (m/s);

d_p - Profundidade de penetração da água (m);

δ - Porosidade aberta do provete do betão;

t - Tempo de penetração (s);

h - Pressão aplicada (mH₂O), 1 bar = 10.207 mH₂O;

A medição da profundidade de penetração de água no provete de betão é melhorada pela utilização de indicadores de cores, nomeadamente uma solução de fenolftaleína, que determina a fronteira da penetração da água. A solução de fenolftaleína produz uma cor rosa em contacto com o betão, se este não estiver carbonatado e com pH superior a 9. O fator de conversão para este coeficiente, de m/s para m², é: $K_w(m^2) = 1.3 \times 10^{-7} K_w(m/s)$.

4.4.3.1 Descrição do ensaio

A permeabilidade ao ar e à água dos betões em estudo, BAC e BACRFA, foi medida numa célula de permeabilidade de Leeds (Figura 4.31). Este permeâmetro permite submeter provetes a uma determinada pressão durante um determinado período, garantindo que o fluxo do fluido que atravessa o provete é estável e uniaxial.

O permeâmetro é constituído por uma célula para o provete, um manómetro de pressão com precisão, o fornecimento de gás estável e um medidor de fluxo na extremidade a jusante (Ferreira, 2000).

Para utilizar o permeâmetro de Leeds é necessário que os provetes sejam cilíndricos, com 50mm de diâmetro e 40 mm de altura. Deste modo, foram realizadas duas lajetas, uma de BAC e outra de BACRFA, com dimensões de $300 \times 300 \times 60 \text{ mm}^3$, nas quais foram caroteados e cortados 6 provetes cilíndricos em cada lajeta, com as dimensões indicadas para utilização no permeâmetro de Leeds (Figura 4.32).

Neste equipamento, o provete de betão é colocado num anel de borracha no interior de uma manga de PVC. A pressão aplicada força o anel de borracha para o interior, contra o provete, tornando estanques as faces laterais deste. Neste caso, de modo a reforçar esta estanquidade foi aplicada uma fina camada de silicone (0.5 mm) nas faces laterais dos provetes e deixada a curar à temperatura ambiente, durante 12 horas antes do início do ensaio. Esta fina camada permite obter uma interface de selagem perfeita com o anel de borracha.



Figura 4.31 - Permeâmetro de Leeds



Figura 4.32 - Provetes utilizados

Relativamente ao procedimento de ensaio adotado, antes de impermeabilizar as faces laterais dos provetes, determinou-se a porosidade aberta das amostras em vácuo, por absorção de água por imersão, de acordo com a norma LNEC E395 (1993). Os provetes foram colocados na câmara de vácuo, na qual foi introduzida água sob vácuo, de tal modo que os provetes ficassem completamente imersos. Após 24 horas de imersão em vácuo, seguido de mais 24 horas à pressão atmosférica, procedeu-se à medição da massa dos provetes saturados M_2 e da massa hidrostática M_3 . Posteriormente, realizou-se a secagem dos mesmos em estufa a 110°C durante 4 dias e procedeu-se à medição da massa seca M_1 . A porosidade aberta foi determinada de acordo com a equação (4.7).

Procedeu-se de seguida à impermeabilização lateral dos provetes, com uma fina camada de silicone, conforme referido anteriormente, para garantir uma penetração uniaxial apenas através dos topos dos provetes. Após 12 horas de cura do silicone, os provetes foram colocados na célula de permeabilidade. Dentro da célula, o provete foi colocado sob pressão no interior de um anel de borracha que veda lateralmente a amostra, depois de se pressionar o topo da célula.

O ar foi aplicado a uma pressão de 3 bar, sendo o fluxo de gás medido na extremidade a jusante, recorrendo a uma pipeta de diâmetro interior de 2.5 mm. Optou-se por uma pipeta de menor diâmetro, uma vez que os betões possuem reduzida permeabilidade por serem auto-compactáveis. Após atingido fluxo estável e laminar no provete (cerca de 30 minutos) foram efetuadas 3 leituras do fluxo constante, através da medição do tempo de percurso de uma bolha de sabão para uma distância conhecida, 10 cm (Figura 4.33).



Figura 4.33 - Medição do fluxo que atravessa o provete

Medido o fluxo do ar no provete, ν e aplicando a equação de D'Arcy modificada (Equação 4.14), determinou-se o coeficiente de permeabilidade ao ar, K_G . Nesta equação, consideraram-se os valores medidos previamente da espessura da secção transversal do provete, L , P_1 igual a 3 bar e P_2 igual à pressão atmosférica, 1 bar.

Após o ensaio de permeabilidade ao ar, os provetes foram conservados no interior da célula de permeabilidade para serem submetidos ao ensaio de permeabilidade à água. Para este ensaio, foi introduzida uma solução de álcool, fenolftaleína e água na câmara em contacto com a parte superior do provete, e a pressão foi aplicada de modo a forçar a solução a penetrar através da amostra. A pressão foi mantida constante durante 3 horas e, posteriormente, o provete é retirado da célula e partido em dois por compressão diametral, sendo medida a profundidade de penetração da solução em 5 leituras (Figuras 4.34 e 4.35).



Figura 4.34 - Penetração da solução em provete de BAC



Figura 4.35 - Penetração da solução em provete de BACRFA

Medida a profundidade de penetração da solução nos provetes e aplicando a equação de Valenta (4.15), determinou-se o coeficiente de permeabilidade à água, K_W .

4.4.3.2 Análise de Resultados

No Quadro 4.14 apresentam-se os resultados da porosidade aberta, δ , obtida nos provetes de BAC e de BACRFA.

Comparando os resultados obtidos de δ com os valores da porosidade aberta obtidos à pressão atmosférica, apresentados no Quadro 4.10, verifica-se que apesar de ser expectável que sob vácuo, a porosidade aberta fosse superior, tal não ocorreu, visto que os resultados são da mesma ordem de grandeza. Este facto poderá ser justificado pela maior uniformidade da

estrutura dos BAC, uma vez que mesmo utilizando-se provetes de dimensões diferentes em ambos os ensaios de determinação da porosidade aberta, não provocou uma variação significativa dos resultados.

Quadro 4.14 - Resultados da porosidade aberta

	Provete	M_1 (g)	M_2 (g)	M_3 (g)	δ (%)	δ_{im} (%)	S_d (%)	CoV (%)
BAC	P1	181.85	190.38	112.26	10.92	10.91	0.06	0.54
	P2	183.70	192.35	113.23	10.93			
	P3	183.35	192.02	113.15	10.99			
	P4	184.28	192.94	113.67	10.92			
	P5	183.49	192.06	113.28	10.88			
	P6	183.39	191.89	113.31	10.82			
BACRFA	P1	186.68	194.91	116.25	10.46	10.65	0.23	2.13
	P2	186.80	195.01	116.23	10.42			
	P3	187.06	195.33	116.38	10.47			
	P4	187.69	196.21	117.11	10.77			
	P5	188.51	197.25	117.52	10.96			
	P6	185.96	194.22	117.87	10.82			

Nos Quadros 4.15 e 4.16 e na Figura 4.36 apresentam-se as características das amostras de BAC e BACRFA utilizadas nos ensaios, nomeadamente, o seu diâmetro (ϕ) e a sua altura (L). São também apresentados os principais resultados dos parâmetros para a determinação do coeficiente de permeabilidade ao ar, K_G , nomeadamente, o tempo médio de percurso de uma bolha de sabão para uma distância de 10 cm (T_{10}) e o fluxo de ar (ν). Na medição da permeabilidade ao ar dos provetes de BAC e de BACRFA, o tempo de percurso de 10 cm de uma bolha de sabão na pipeta de 2.5 mm de diâmetro situou-se entre 10 e 15 segundos.

Quadro 4.15 - Coeficiente de permeabilidade ao ar no BAC

BAC								
Provete	ϕ (mm)	L (mm)	T_{10} (s)	νe^{-08} (m ³ /s)	$K_G e^{-16}$ (m ²)	$K_{Gm} E^{-16}$ (m ²)	$S_d E^{-16}$ (m ²)	CoV (%)
P1	49.76	40.93	10.26	4.783	0.508	0.483	0.035	7.30
P2	49.85	40.81	10.23	4.797	0.507			
P3	49.71	41.56	11.19	4.388	0.475			
P4	49.70	41.11	11.89	4.130	0.442			
P5	49.72	41.29	12.44	3.945	0.424			
P6	49.68	40.82	11.66	4.209	0.448			

Quadro 4.16 - Coeficiente de permeabilidade ao ar no BACRFA

BACRFA								
Provete	θ (mm)	L (mm)	T_{10} (s)	ν (m ³ /s)	$K_G e^{-16}$ (m ²)	$K_{Gm} E^{-16}$ (m ²)	$S_d E^{-16}$ (m ²)	CoV (%)
P1	49.64	41.07	12.43	3.948	0.423	0.443	0.034	7.78
P2	49.83	40.34	10.82	4.537	0.474			
P3	50.00	41.23	11.24	4.366	0.463			
P4	49.68	41.22	12.78	3.841	0.412			
P5	49.74	41.63	11.18	4.391	0.475			
P6	49.62	40.93	10.42	4.712	0.504			

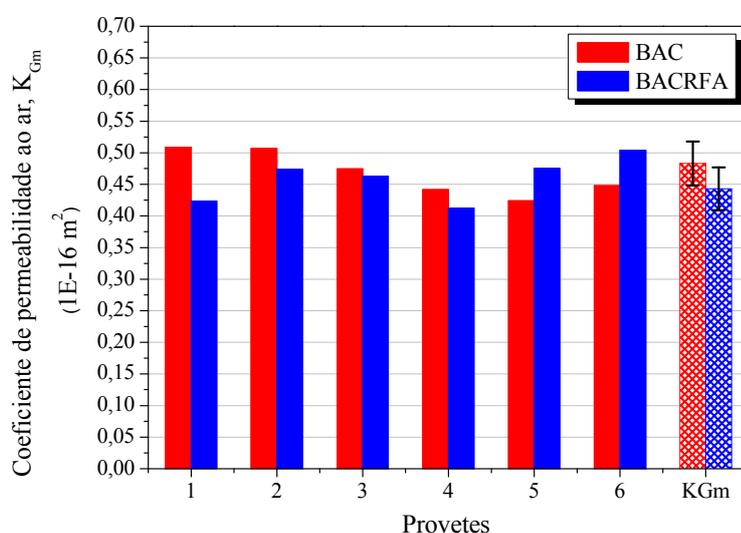


Figura 4.36 - Coeficiente de permeabilidade ao ar nos provetes de BAC e BACRFA

Verificou-se que a permeabilidade ao ar é semelhante nos provetes das duas composições, havendo apenas uma redução no coeficiente de permeabilidade ao ar do BACRFA de 8.3% relativamente ao obtido no BAC, que se encontra na ordem de magnitude do erro do ensaio, que normalmente possui uma elevada dispersão. Deste modo, verifica-se que a adição de fibras no BAC não interfere na permeabilidade ao ar deste tipo de betão, desde que a composição seja devidamente otimizada, como foi no presente projeto.

Na medição da permeabilidade à água dos provetes de BAC e de BACRFA, os valores adotados para a pressão foi de 3 bar a pressão constante durante 3 horas.

Nos Quadros 4.17 e 4.18 apresentam-se os resultados obtidos da profundidade média de penetração de água em cada provete de BAC e BACRFA, d_{pm} , e o coeficiente de permeabilidade à água, K_w .

Quadro 4.17 - Coeficiente de permeabilidade à água no BAC

BAC								
Provete	d_p (mm)	d_{pm} (mm)	S_d (mm)	CoV (%)	$K_w e^{-18}$ (m ²)	$K_{wm} E-18$ (m ²)	$S_d E-18$ (m ²)	CoV (%)
P1	16.59				5.90			
P2	18.01				6.97			
P3	15.15	14.88	3.25	21.81	4.96	4.94	1.97	39.95
P4	17.62				6.66			
P5	10.02				2.15			
P6	11.91				3.02			

Quadro 4.18 - Coeficiente de permeabilidade à água no BACRFA

BACRFA								
Provete	d_p (mm)	d_{pm} (mm)	S_d (mm)	CoV (%)	$K_G e^{-18}$ (m ²)	$K_{wm} E-18$ (m ²)	$S_d E-18$ (m ²)	CoV (%)
P1	12.24				3.08			
P2	18.18				6.77			
P3	16.83	15.05	3.31	21.99	5.83	4.91	1.90	38.61
P4	16.23				5.58			
P5	9.72				2.04			
P6	17.07				6.19			

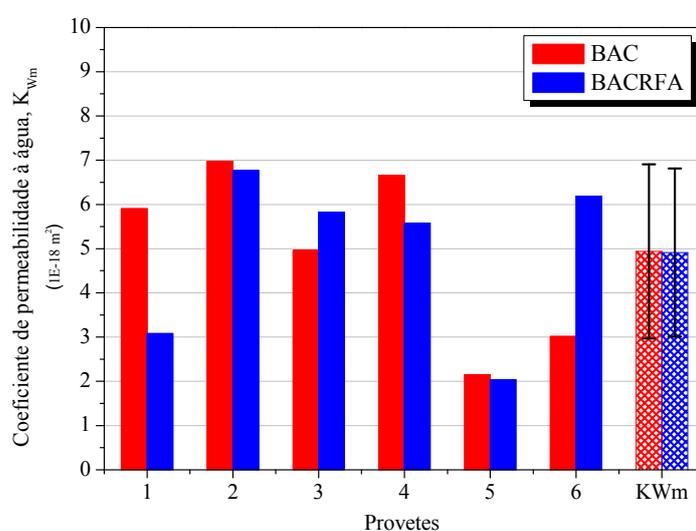


Figura 4.37 - Coeficiente de permeabilidade à água nos provetes de BAC e BACRFA

Nos ensaios de permeabilidade à água efetuados com provetes de BAC e de BACRFA verificou-se que a profundidade de penetração da solução e, conseqüentemente, o coeficiente de permeabilidade à água nas amostras possuíram um elevado coeficiente de variação. Esta dispersão nos resultados foi verificada em ambas as composições de BAC e de BACRFA, pelo que poderá ser devida a alguma deficiente montagem do ensaio ou estanquidade da câmara, que impediu de efetuar a leitura de penetração corretamente. No entanto, em termos de resultados médios, os coeficientes de permeabilidade à água são semelhantes no BAC e no BACRFA, pelo que também se poderá concluir que a adição de fibras ao betão, na percentagem adotada e na composição desenhada, não interfere na permeabilidade à água do BAC.

4.4.4 Resistividade Elétrica

A resistividade elétrica é uma parte essencial de células de corrosão, uma vez que a elevada resistividade do eletrólito (neste caso o betão) reduz as correntes de corrosão e torna lenta a velocidade de corrosão. Deste modo, pretende-se com a avaliação da resistividade elétrica no BACRFA, perceber se a inclusão das fibras no betão altera significativamente o nível de fluxo da corrente associada à corrosão (Costeira, 2011).

4.4.4.1 Descrição do ensaio

A avaliação da resistividade elétrica dos betões em estudo foi realizada por intermédio de um resistímetro de Wenner que efetua a medição da resistividade elétrica, tendo-se seguido as especificações da RILEM.TC.154-EMC (2004). O resistímetro é composto por 4 elétrodos fixos, afastadas entre si de 40 mm, que se aplicam simultaneamente na superfície do betão. As extremidades dos elétrodos possuem um término em esponja, de 4 mm de diâmetro, que permite melhorar o contacto com a superfície do betão.

O resistímetro efetua a medição da resistividade elétrica aplicando uma corrente entre os elétrodos exteriores, e medindo a diferença de potencial entre os elétrodos interiores, conforme representado na Figura 4.38.

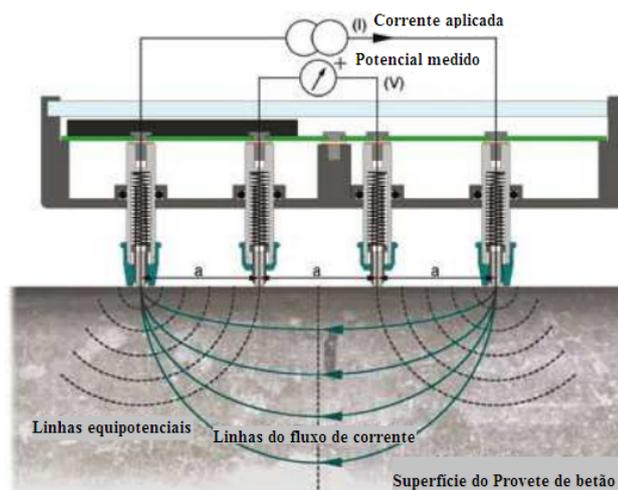


Figura 4.38 - Esquema de funcionamento do resistivímetro de Wenner

A resistividade elétrica pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$\rho = 2 \times \pi \times a \times \frac{V}{I} \quad (4.16)$$

em que,

ρ - Resistividade elétrica ($\Omega \cdot m$);

a - Distância entre os eletrodos (m);

V - Diferença de potencial medido (V);

I - Intensidade de corrente aplicada (A);

A resistividade elétrica foi medida em provetes cilíndricos de BAC e BACRFA de 300 mm de diâmetro e 150 mm de altura, aos 28 dias de idade. Os ensaios foram efetuados antes de estes provetes terem sido utilizados nos ensaios de determinação do módulo de elasticidade e de avaliação do comportamento em compressão.

A humidade relativa dos provetes de betão altera as leituras obtidas, pelo que, de modo a evitar uma fonte extra de variabilidade nos resultados, optou-se por realizar as leituras em provetes saturados. Antes de efetuar cada leitura, as extremidades dos eletrodos foram colocadas imersas em água durante 30 segundos de forma a absorverem água que possibilita uma menor variação e mais rápida estabilização da leitura efetuada pelo resistivímetro (RILEM.TC.154-EMC, 2004). De forma a aumentar a fiabilidade dos resultados foram efetuadas três leituras no mesmo provete cilíndrico, ao longo de 3 geratrizes espaçadas de

120°. Na Figura 4.39 é apresentada uma foto ilustrativa da forma como foram efetuadas as leituras.



Figura 4.39 - Esquema de leitura da resistividade elétrica nos provetes cilíndricos

É importante que as medições não sejam restritas a uma área reduzida, mas sim a uma área representativa da superfície do elemento. Assim, consideram-se resultados com baixa dispersão se o coeficiente de variação em qualquer conjunto de medições no mesmo betão não exceder 10%, admitindo-se uma dispersão normal se esse coeficiente não exceder 20%.

No Quadro 4.19 é apresentada a interpretação das leituras resultantes em betão convencional, aconselhado pelo comité da RILEM (TC.154-EMC) para uma temperatura de 20°C. No entanto, no caso do BRFA, não tem sentido aplicar esta interpretação de leituras, visto que se desconhece se será válida, uma vez que deverá ser considerado o tipo e quantidade de fibras de aço adotadas, cuja elevada condutividade influencia a medição da resistividade.

Quadro 4.19 - Risco de corrosão associado à resistividade elétrica

Resistividade (kΩ.cm)	Risco de corrosão
10	Elevado
10-50	Moderado
50-100	Baixo
>100	Desprezável

4.4.4.2 Análise de Resultados

A resistividade elétrica média, ρ_m , obtida nos provetes de BAC e de BACRFA encontra-se apresentada no Quadro 4.20.

Quadro 4.20 - Resistividade elétrica média dos provetes de BAC e de BACRFA

	BAC			BACRFA		
Idade (dias)	7	28	90	7	28	90
ρ_m (k Ω .cm)	7.3	10.1	11.4	2.6	3.7	4.5
Desvio Padrão	0.2	0.2	0.4	0.3	0.6	0.2
CoV (%)	2.71	1.64	3.46	22.75	21.47	4.01

Verifica-se que os valores da resistividade elétrica do BACRFA, são inferiores aos valores da resistividade elétrica do BAC, e aumentam com a idade, verificando-se que aos 90 dias o valor parece não estar ainda estabilizado. Esta reduzida resistividade elétrica no betão deve-se à elevada condutividade elétrica das fibras de aço que reduz a resistividade global. O elevado coeficiente de variação obtido no BACRFA aos 7 e 28 dias também se deve à presença das fibras de aço que influenciam significativamente o campo elétrico gerado pelo resistivímetro de Wenner.

4.4.5 Difusão dos cloretos por migração em regime não estacionário

A corrosão das fibras de aço devido à ação dos cloretos é um dos principais problemas que afeta a durabilidade das estruturas de BACRFA. A penetração dos cloretos no betão pode dever-se a diversos fatores tais como o efeito de molhagem e secagem da água contendo cloretos (ambiente marítimo), a utilização de agregados salinos mal lavados (areias do mar), a aplicação de adjuvantes contendo cloretos, ambientes industriais agressivos, etc.

Os principais parâmetros que influenciam este fenómeno envolvem, por um lado, aspetos relacionados com a composição, compactação e cura do betão, e por outro, aspetos relacionados com o ambiente de exposição a que está sujeito.

É um processo que ocorre apenas em meio líquido, isto é, se os poros do betão não tiverem água a penetração não ocorre. A penetração pode ocorrer através dos seguintes mecanismos de transporte:

- Permeação: Transporte de gases ou líquidos por um gradiente de pressões - Caso típico quando a estrutura está sujeita ao contacto de líquidos sob pressão que contém cloretos, como é o caso da água do mar;

- Absorção capilar: Penetração de líquidos por forças de sucção capilar - Caso típico quando a estrutura está sujeita a ciclos de molhagem e secagem por águas contaminadas com cloretos;
- Difusão: Penetração de gases, líquidos ou iões por um gradiente de concentração - Caso típico quando no interior da estrutura existem diferentes concentrações de cloretos.

A escolha do tipo de mecanismo de transporte é função das condições de exposição e da humidade presente nos poros do betão, sendo que a continuidade e comunicabilidade entre os mesmos determina a maior ou menor facilidade à penetração dos cloretos.

Os parâmetros que têm influência na penetração dos cloretos no betão são:

- Estrutura porosa, determinada pela composição (razão A/C, composição do cimento, adições e adjuvantes), compactação e condições de cura do betão;
- Propriedades de fixação dos cloretos, determinadas pela composição do cimento, incluindo adições;
- Teor de humidade e tipo de exposição, determinadas pelas condições macro e micro ambientais a que a estrutura está sujeita.

Quando na zona das armaduras ou das fibras de aço se atinge a quantidade crítica de cloretos ($0.4\% < Cl_{crit} < 1\%$ do peso do cimento), verifica-se a destruição da película passiva que protege as armaduras e as fibras de aço, ocorrendo a corrosão.

Ao contrário da corrosão por carbonatação que é generalizada, a ação dos cloretos é mais pontual.

O presente ensaio tem por objetivo avaliar a penetração de cloretos no betão e baseia-se na difusão em regime não estacionário. A difusão resulta da transferência de massa por movimento aleatório das moléculas livres ou iões na solução dos poros, resultando num fluxo de uma região de maior concentração para uma região de menor concentração da substância difusora (Costeira, 2011). Dada a limitação de tempo para a realização dos ensaios, foi acelerada a difusão dos cloretos impondo uma diferença de potencial, conforme descrito na secção seguinte.

4.4.5.1 Descrição do ensaio

O ensaio de penetração de cloretos foi realizado de acordo com a especificação do LNEC E463 (2004) que descreve a determinação do coeficiente de difusão de cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário.

No ensaio foram usados provetes cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento. De acordo com o ponto 6.3 da referida especificação, preparou-se o provete de ensaio após 28 dias de cura, cortando primeiro, o cilindro em duas metades (em 2 cilindros de 100 mm × 100 mm) e depois cortando uma porção de 50 ± 2 mm de espessura a partir de uma das metades. A extremidade mais próxima do primeiro corte (a superfície do meio) foi exposta à solução de cloretos (solução catódica) (Figura 4.40).

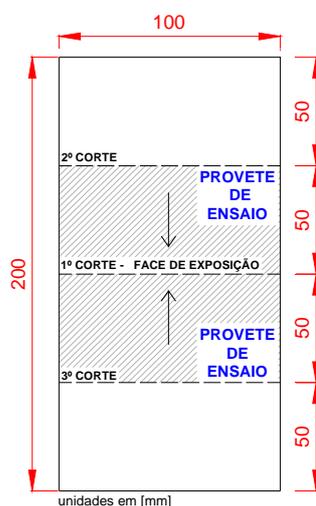


Figura 4.40 - Preparação dos provetes de ensaio

Foram utilizados 3 troços cilíndricos de 100 mm × 50 mm de cada tipo de betão. Antes da exposição dos provetes à solução de cloretos, procedeu-se ao tratamento por vácuo dos provetes numa câmara de vácuo, durante 3 horas, seguido de mais uma hora com solução saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Cada troço foi colocado dentro de uma manga de borracha, apertada com abraçadeiras, que garantiram a estanquidade da célula, de forma a não existir contacto entre a solução catódica e anódica (Figura 4.41).

Foram utilizados dois reagentes, uma solução anódica (NaOH 0.3N) que foi aplicada na superfície diametral superior do provete e uma solução catódica (10% NaCl) que foi aplicada

na superfície diametral inferior. Deste modo, apenas as superfícies diametraes, superior e inferior, se encontravam em contacto com os reagentes (Figura 4.41).

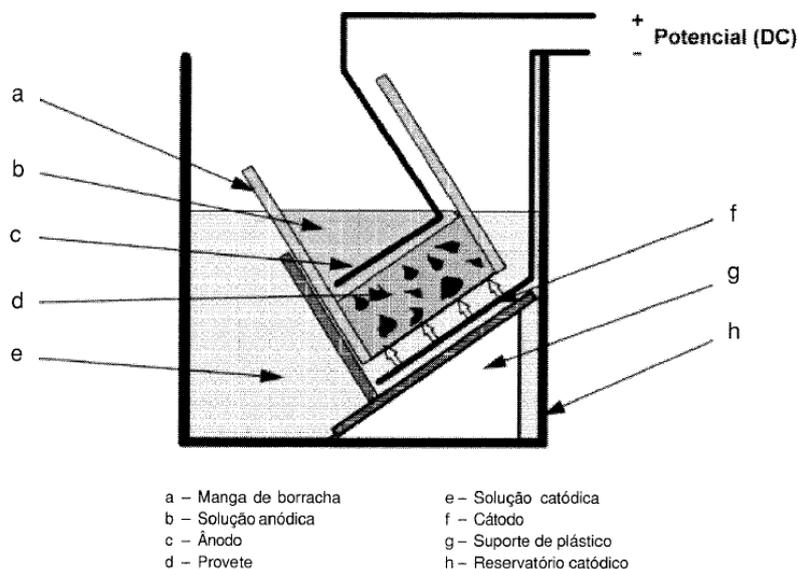


Figura 4.41 - Preparação de provete para realização do ensaio em reservatório catódico

Encheu-se o reservatório catódico com cerca de 12 litros de solução catódica e foram colocados os troços de cada betão com as respetivas mangas e com 300 ml da solução anódica (Figura 4.42).



Figura 4.42 - Esquema do ensaio de difusão de cloretos (LNEC E463)

Para aplicação da diferença de potencial foi utilizada uma fonte de alimentação elétrica, com capacidade de fornecer e manter 60 Volts de corrente contínua e capacidade máxima de 3 Amperes. O ensaio de migração foi realizado com a introdução de uma tensão inicial de 30 Volts a passar em cada provete. O ajuste da tensão foi efetuado de acordo com a tabela que se apresenta no Quadro 4.21.

Quadro 4.21 - Tabela com tensão de teste e duração de ensaio (Nordic Council of Ministers)

Corrente inicial I_{30V} (com 30 V) (mA)	Diferença de potencial aplicada U (após o ajuste) (V)	Nova corrente inicial admissível (mA)	Duração do ensaio t (horas)
$I_0 < 5$	60	$I_0 < 10$	96
$5 < I_0 < 10$	60	$10 < I_0 < 20$	48
$10 < I_0 < 15$	60	$20 < I_0 < 30$	24
$15 < I_0 < 20$	50	$25 < I_0 < 35$	24
$20 < I_0 < 30$	40	$25 < I_0 < 40$	24
$30 < I_0 < 40$	35	$35 < I_0 < 50$	24
$40 < I_0 < 60$	30	$40 < I_0 < 60$	24
$60 < I_0 < 90$	25	$50 < I_0 < 75$	24
$90 < I_0 < 120$	20	$60 < I_0 < 80$	24
$120 < I_0 < 180$	15	$60 < I_0 < 90$	24
$180 < I_0 < 360$	10	$60 < I_0 < 120$	24
$I_0 > 360$	10	$I_0 > 120$	6

Terminado o ensaio, a medição da profundidade de penetração foi efetuada através de um processo colorimétrico com solução de nitrato de prata (AgNO_3 0.1N). Para isso, os provetes foram divididos por compressão diametral em duas partes, as quais foram pulverizadas com a solução de nitrato de prata (Figura 4.43).

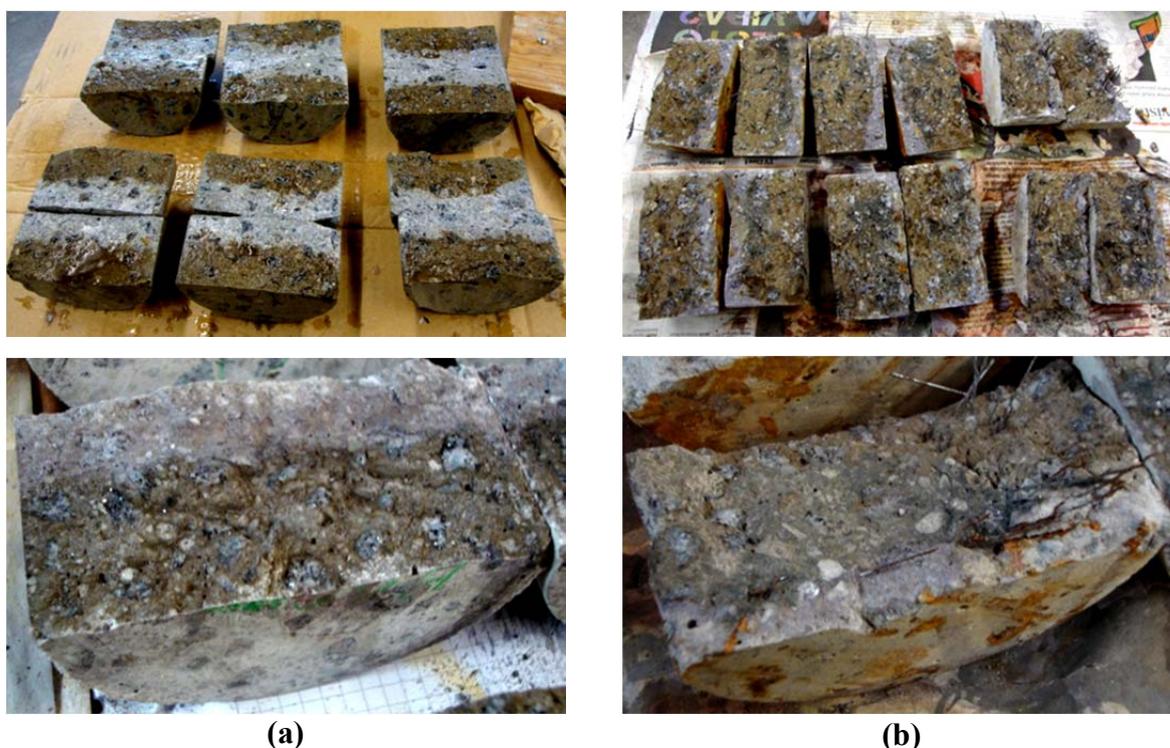


Figura 4.43 - Pormenor dos provetes para realização de leituras de penetração de cloretos

(a) BAC e (b) BACRFA

Conforme se verifica na Figura 4.43, após a solução secar, o nitrato de prata apresenta uma tonalidade mais clara que define até onde penetraram os cloretos na matriz.

Efetuada a medição da profundidade de penetração dos cloretos, procedeu-se à determinação do coeficiente de difusão em regime não estacionário, que é dado pela seguinte expressão:

$$D = \frac{0.0239(273 + T) \times L}{(U - 2) \times t} \left(x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T) \times L \times x_d}{U - 2}} \right) \quad (4.17)$$

sendo que,

D - Coeficiente de difusão no estado não estacionário ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$);

U - Valor absoluto da diferença de potencial aplicada (V);

T - Valor médio das temperaturas inicial e final da solução anódica ($^{\circ}\text{C}$);

L - Espessura do provete (mm);

x_d - Valor médio da profundidade da penetração (mm);

t - Duração do ensaio (horas).

4.4.5.2 Análise de Resultados

Nos Quadros 4.22 e 4.23 apresentam-se as principais características dos provetes de BAC e de BACRFA utilizadas nos ensaios, nomeadamente, o seu diâmetro (ϕ), a sua altura (L), a corrente inicial com uma diferença de potencial aplicada de 30 V (I_{30V}), a voltagem aplicada (U), a corrente inicial admissível (I_I), a temperatura média inicial (T_I), a duração do ensaio (t), a corrente final (I_F) e a temperatura média final (T_F).

Quadro 4.22 - Características dos provetes de BAC

BAC									
Provete	ϕ (mm)	L (mm)	I_{30V} (mA)	U (V)	I_I (mA)	T_I ($^{\circ}\text{C}$)	t (h)	I_F (mA)	T_F ($^{\circ}\text{C}$)
P1	100	50.42	61.10	25.0	39.90	20.0	24	37.70	22.0
P2	100	50.47	60.80	25.0	39.60	20.0	24	37.80	22.0
P3	100	50.56	65.90	25.0	42.10	20.0	24	41.10	22.0

Quadro 4.23 - Características dos provetes de BACRFA

BACRFA									
Provete	θ (mm)	L (mm)	I_{30V} (mA)	U (V)	I_I (mA)	T_I (°C)	t (h)	I_F (mA)	T_F (°C)
P1	100	50.92	106.20	15.0	41.70	20.0	24	34.60	22.0
P2	100	50.25	160.70	15.0	58.90	20.0	24	46.00	22.0
P3	100	51.13	134.10	15.0	45.10	20.0	24	33.00	22.0

Nos Quadros 4.24 e 4.25 apresentam-se os resultados da profundidade de penetração dos iões cloreto, assim como os coeficientes de difusão obtidos, nos provetes de BAC e de BACRFA.

Quadro 4.24 - Coeficiente de difusão de cloretos no BAC

BAC												
Provete	Profundidade de Penetração dos iões Cloreto (mm)								D E-12 (m ² /s)	D_m E-12 (m ² /s)	S_d E-12 (m ² /s)	CoV (%)
	1	2	3	4	5	6	7	x_d				
P1	19.44	21.06	20.25	19.29	18.73	16.15	17.07	18.86	10.42			
P2	18.48	18.09	20.43	18.82	18.46	17.09	18.85	18.60	10.28	10.27	0.15	1.49
P3	18.93	16.47	16.79	19.17	19.79	17.57	19.38	18.30	10.11			

Quadro 4.25 - Coeficiente de difusão de cloretos no BACRFA

BACRFA												
Provete	Profundidade de Penetração dos iões Cloreto (mm)								D E-12 (m ² /s)	D_m E-12 (m ² /s)	S_d E-12 (m ² /s)	CoV (%)
	1	2	3	4	5	6	7	x_d				
P1	15.27	16.84	10.43	10.40	12.18	10.23	7.20	11.79	10.34			
P2	13.90	19.01	20.74	19.57	17.42	16.35	13.18	17.17	15.67	11.61	3.59	30.93
P3	14.25	9.32	8.90	11.05	10.30	11.33	6.66	10.26	8.83			

Analisando os resultados obtidos verifica-se que os coeficientes de difusão no BACRFA (11.61E-12 m²/s) e no BAC (10.27E-12 m²/s) são semelhantes. No entanto, a base de comparação entre BAC e BACRFA poderá não ser tão imediata, uma vez que as fibras de aço poderão proporcionar que os iões cloreto se fixem preferencialmente nas fibras, impedindo ou retardando a penetração dos mesmos na matriz do betão. A própria metodologia do ensaio indicou o aparecimento de material corroído na solução catódica, verificando-se um aumento do mesmo com o decorrer do ensaio. Na Figura 4.44 verifica-se o aspeto límpido da solução catódica no ensaio com provetes de BAC e nas Figuras 4.45 e 4.46 verifica-se a formação de material corroído com o decurso do ensaio de BACRFA.



Figura 4.44 - Observação do aspeto límpido da solução catódica no ensaio com provetes de BAC



Figura 4.45 - Observação da formação de resíduos provenientes da corrosão das fibras de aço durante o ensaio com provetes de BACRFA



Figura 4.46 - Produtos de corrosão das fibras de aço visíveis no decorrer do ensaio de provetes de BACRFA

4.4.5.3 Corrosão das fibras de aço - Ensaio não normalizado

Na sequência do estudo do efeito da corrosão das fibras de aço, e com o objetivo de verificar se esta pode, ou não, provocar micro-fissuração e micro-spalling do betão envolvente, foram realizados ensaios não normalizados, baseados no procedimento para determinação do coeficiente de difusão de cloretos por migração em regime não estacionário. Deste modo, foram colocados 3 provetes de BACRFA, submetidos a uma diferença de potencial de 30 V e outros 3 provetes de BACRFA submetidos a 45 V. Com o intuito de simular uma situação de extrema agressividade, foi aumentado o período de duração do ensaio para 72 horas, de modo a induzir uma intensa corrosão das fibras.

Observou-se, novamente, que com o decorrer dos ensaios, as fibras de aço apresentaram sinais crescentes de corrosão e conseqüente degradação.

Após 72 horas de exposição, os provetes de BACRFA apresentavam corrosão superficial muito acentuada, com mais intensidade em função da crescente agressividade do meio ambiente. A secção transversal das fibras diminuiu ao longo do comprimento de penetração de iões cloreto e verificou-se o aparecimento de macro-fissuração na superfície exterior dos provetes (Figura 4.47). Esta macro-fissuração deverá ter sido causada pelo aumento do volume das fibras associado ao efeito que a corrosão provoca no aço, visto que a formação de óxidos de ferro envolve um aumento do volume das fibras.



Figura 4.47 - Corrosão superficial e macro-fissuração observada nos provetes ensaiados (face superior exposta à solução anódica)

4.4.5.4 Resistência à tração por compressão diametral

Após o período de exposição definido anteriormente, de modo a avaliar o efeito da corrosão das fibras na capacidade resistente do BACRFA, foi determinada a resistência à tração por compressão diametral dos provetes, de acordo com as indicações da norma NP EN 12390-6 (2003).

O procedimento deste ensaio consistiu em posicionar o provete em posição central na máquina de ensaio, assegurando que o prato superior está paralelo ao inferior durante a aplicação da carga. Posteriormente, aplicou-se a carga aumentando-a de forma contínua à velocidade constante de 0.4 kN/s (Figura 4.48).

Foram também realizados os mesmos ensaios em provetes de referência, sem terem sido expostos a migração de cloretos, de modo a se poder avaliar o efeito da corrosão das fibras na resistência à tração direta do BACRFA (Figura 4.49).

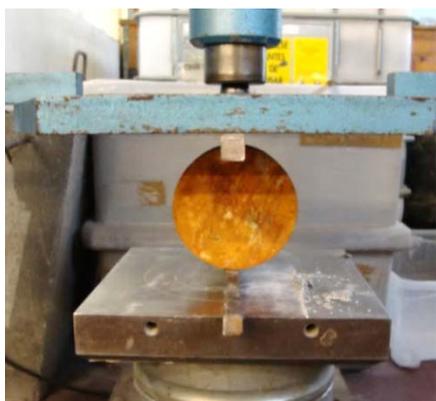


Figura 4.48 - Configuração do ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral



Figura 4.49 - Provete de BACRFA após ensaio de resistência à tração por compressão diametral, com e sem exposição à migração de cloretos

Após os ensaios, na secção de fratura foi observada intensa corrosão nas fibras de aço (Figuras 4.49 e 4.50). O modo predominante de rotura foi o rompimento da fibra (Figura 4.51).



Figura 4.50 - Corrosão superficial dos provetes de BACRFA e corrosão das fibras de aço no comprimento de penetração dos cloretos



Figura 4.51 - Secção de fratura dos provetes de BACRFA

A resistência à tração por compressão foi calculada de acordo com a seguinte equação:

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times \phi} \quad (4.18)$$

sendo que,

f_{ct} - Resistência à tração por compressão (MPa);

F - Força máxima aplicada (N);

L - Comprimento da linha de contacto do provete (mm);

ϕ - Diâmetro do provete (mm).

Os valores obtidos da resistência à tração por compressão diametral encontram-se apresentados nos Quadros 4.26, 4.27 e 4.28.

Quadro 4.26 - Resultados de f_{ct} em provetes submetidos a 30 V durante 72 horas

BACRFA - 30 V - 72 horas					
Provete	ϕ (mm)	L (mm)	Massa perdida (%)	F (kN)	f_{ct} (MPa)
P1	100	50	0.44	51.26	6.53
P2	100	50	0.94	37.22	4.74
P3	100	49	1.03	44.20	5.73
Média			0.80	44.20	5.67
S_d			0.0032	7.02	0.90
CoV (%)			39.67	15.88	15.81

Quadro 4.27 - Resultados de f_{ct} em provetes submetidos a 45 V durante 72 horas

BACRFA - 45 V - 72 horas					
Provete	ϕ (mm)	L (mm)	Massa perdida (%)	F (kN)	f_{ct} (MPa)
P1	100	48	1.22	51.26	6.53
P2	100	46	1.91	37.22	4.74
P3	100	38	1.39	44.20	5.73
Média			1.51	21.79	3.13
S_d			0.36	4.43	0.29
CoV (%)			23.70	20.34	9.12

Quadro 4.28 - Resultados de f_{ct} em provetes sem ação da corrosão

Provete	ϕ (mm)	L (mm)	F (kN)	f_{ct} (MPa)
P1	100	45	45.44	6.43
P2	100	42	38.00	5.76
P3	100	46	33.12	4.58
Média			38.85	5.59
S_d			6.20	0.93
CoV (%)			15.97	16.71

Os resultados apresentados indicam que a resistência à tração por compressão diametral do BACRFA não foi significativamente afetada pela corrosão das fibras, quando estas estavam parcialmente corroídas (30 V). No entanto, quando as fibras estavam severamente corroídas (45 V), o modo predominante de rotura foi o rompimento da fibra, e a corrosão das fibras

causou fissuração, com uma conseqüente redução de 44 % da resistência à tração, em comparação com o betão sem ação da corrosão.

Estes ensaios, realizados em condições de extrema agressividade, permitiram evidenciar que a corrosão das fibras de aço pode induzir a formação de macro-fissuração no betão envolvente e o conseqüente spalling.

Analisando a variação da massa dos provetes antes e após os ensaios, foi possível observar um aumento em massa de 0.80% quando os provetes foram submetidos a 30 V, e um aumento em massa de 1.51% quando os provetes foram submetidos a 45 V.

Importa ainda salientar que os efeitos da corrosão das fibras analisados foram obtidos para condições de elevada agressividade, cuja quantificação não é facilmente comparável com os agentes agressivos presentes no meio ambiente real.

4.4.6 Resistência à penetração de cloretos por imersão

No caso de imersão total do betão em solução de cloretos, a penetração dos iões verifica-se, em primeiro lugar devido ao mecanismo de absorção e, muito provavelmente por diferenças de pressão (permeação). O movimento da água e, conseqüentemente, o transporte de cloretos nela dissolvidos, continuará apenas através da rede de poros e fissuras do betão, que dependerá da relação entre a taxa de evaporação, a sucção capilar e a pressão hidráulica.

Os iões cloreto passam então para a pasta cimentícia, podendo ser fixados por esta, devido à capacidade química e física de fixar uma certa quantidade de iões cloreto, nomeadamente, podendo ocorrerem reações entre os cloretos e o aluminato tricálcico. Assim, serão os iões livres que poderão intervir na corrosão das fibras de aço. Se o betão se encontrar carbonatado, os iões cloreto até então combinados passarão a estar livres, aumentando a concentração de cloretos na água dos poros, o que torna o risco de corrosão mais elevado.

Embora a penetração de cloretos para o interior de betão se verifique por diferentes mecanismos, sobretudo difusão e absorção/desabsorção (ambientes marítimos) e ainda por permeação e eletro-migração, tem sido corrente usar funções que variam com a raiz quadrada do tempo para quantificar a resistência à penetração de cloretos. Estas funções suportam-se na teoria de difusão.

O melhor método para determinar a velocidade de transporte dos iões cloreto no betão, designada usualmente por coeficiente de difusão dos cloretos, baseia-se na determinação dos perfis de penetração de cloretos no betão, em condições de exposição natural, apesar de ser um método extremamente moroso.

4.4.6.1 Descrição do ensaio

O ensaio de penetração de cloretos por imersão foi realizado de acordo com a especificação do LNEC E390 (1993), que estabelece um ensaio para determinar parâmetros relativos à penetração de cloretos no betão endurecido ou outros materiais de matriz cimentícia, com base na medição do perfil de penetração de cloretos em amostras após imersão em solução com cloretos.

Para este ensaio foram utilizados um provete de BAC e outro de BACRFA, com 100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento que após 28 dias de cura foram cortados a meio utilizando uma máquina de corte, de modo a obter duas amostras de $\phi 100 \times 100$ (mm) para cada tipo de betão.

Após secagem dos provetes à temperatura ambiente, foram impermeabilizadas as suas faces, com exceção da face de corte para permitir que os cloretos penetrassem no betão (Figura 4.52).

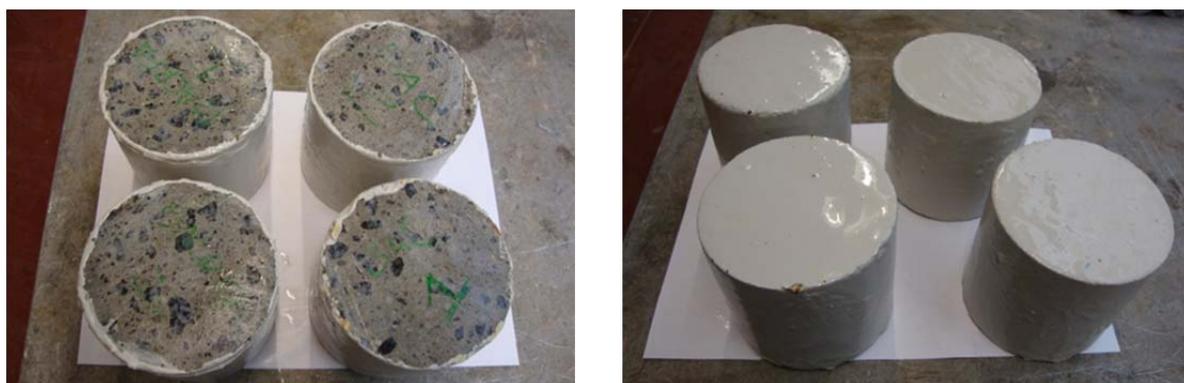


Figura 4.52 - Aspeto dos provetes impermeabilizados

Preparou-se uma solução saturada de hidróxido de cálcio à qual se adicionou 15% de cloreto de sódio. Após secagem dos provetes, procedeu-se à imersão dos mesmos, num depósito com a solução aquosa à temperatura ambiente ($T=21^{\circ}\text{C}$) (Figura 4.53).



Figura 4.53 - Imersão dos provetes

Após um período de exposição de 90 dias, foram retirados os provetes de imersão e determinou-se a concentração de cloretos, C_x , a várias profundidades, x . A determinação de C_x foi realizada através do “*Rapid Chloride Test*” (RCT-500) da Germann Instruments A/S (Figura 4.54). O RCT-500 consiste num *kit* de rápida e fácil utilização para determinação do teor de cloretos em percentagem do peso do cimento endurecido, medido em amostras de pó de betão. Deste modo, foram colhidas amostras de pó com 1.5g a diversas profundidades, através de perfuração dos provetes com uma broca de 8 mm (Figura 4.55).



Figura 4.54 - *Kit* RCT-500 da Germann Instruments A/S



Figura 4.55 - Perfuração dos provetes

Posteriormente, cada amostra de pó foi misturada com um líquido de extração que permite remover iões indesejáveis e extrair os iões cloreto. O teor de cloretos é obtido por intermédio

de um elétrodo, calibrado por 4 calibradores, que é introduzido no interior da solução e avalia o teor de cloretos (Figura 4.56 e 4.57).



Figura 4.56 - *Kit RCT-500*: Calibradores de elétrodo, frascos com líquido de extração, agente líquido do elétrodo e o elétrodo.



Figura 4.57 - Medição do teor de cloretos

Depois de obtido o perfil do teor de cloretos (variação da concentração de cloretos C_x com a profundidade x) para cada provete de BAC e de BACRFA procedeu-se à determinação do teor de cloretos à superfície do betão, C_s , por análise de regressão polinomial de 2º grau.

De seguida, conhecido o perfil do teor de cloretos no betão e com base na 2ª lei de Fick procedeu-se à determinação do coeficiente médio de difusão aparente, D , através da seguinte expressão:

$$C_x = C_s - (C_s - C_0) \operatorname{erf} \left(\frac{1/2 x}{\sqrt{Dt}} \right) \quad (4.19)$$

sendo que,

C_x - Teor de cloretos (%) medido à profundidade x (mm) e para um tempo de imersão t (s);

C_s - Teor de cloretos (%) calculado à superfície do betão após um tempo de imersão t (s);

C_0 - Teor inicial de cloretos no betão (%);

D - Coeficiente de difusão aparente (m^2/s);

erf - Função erro.

onde,

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (4.20)$$

De modo a estabelecer comparação entre os resultados obtidos nos provetes de BACRFA com os obtidos nos provetes de BAC, foi também calculado o parâmetro de penetração dos cloretos, K (mm/ano^{0.5}), que permite prever a penetração de cloretos ao longo dos anos aplicando regressão linear em função do tempo de exposição. Este parâmetro é calculado de acordo com a seguinte expressão:

$$K = 2\sqrt{D} \operatorname{erf}^{-1}\left(\frac{C_s - C_r}{C_s - C_0}\right) \quad (4.21)$$

em que,

C_r - Limite referência do teor de cloretos no betão, imposto pela norma NP ENV 206-1 (0.4%).

4.4.6.2 Análise de Resultados

Apresentam-se no Quadro 4.29 e nas Figuras 4.58 e 4.59 os perfis de cloretos obtidos nos provetes de BAC e de BACRFA.

Quadro 4.29 - Perfis de cloretos dos provetes de BAC e BACRFA

BAC				BACRFA			
Provete 1		Provete 2		Provete 1		Provete 2	
x (mm)	C_x (%)						
1.00	0.4400	1.00	0.3300	1.00	0.3700	1.20	0.3600
1.70	0.2050	2.00	0.0820	1.80	0.1050	2.10	0.0950
2.60	0.0250	3.00	0.0480	2.50	0.0056	3.00	0.0010
				3.50	0.0031		

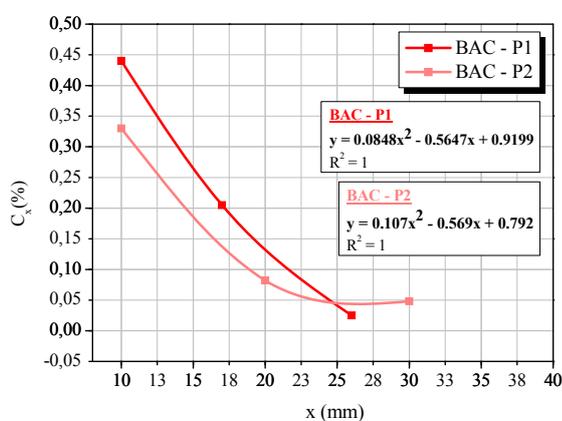


Figura 4.58 - Perfil de cloretos dos provetes de BAC

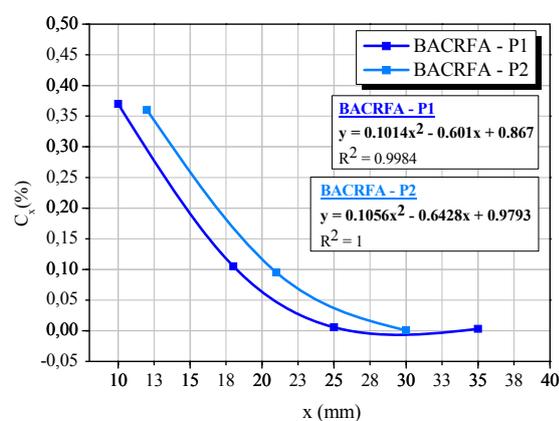


Figura 4.59 - Perfil de cloretos dos provetes de BACRFA

No Quadro 4.30 apresentam-se os valores dos coeficientes de difusão aparente, D , e dos parâmetros de penetração dos cloretos, K , obtidos para os provetes de BAC e de BACRFA.

Quadro 4.30 - Resultados de D e de K dos provetes de BAC e BACRFA

	BAC		BACRFA	
	D_{E-12} (m^2/s)	K ($mm/ano^{0.5}$)	D_{E-12} (m^2/s)	K ($mm/ano^{0.5}$)
Média	11.62	47.55	8.21	40.78
Desvio Padrão	0.45	0.40	0.13	1.23
Coeficiente de variação (%)	3.88	0.84	1.66	3.02

Analisando os resultados apresentados no Quadro 4.30 verifica-se que o coeficiente de difusão é mais elevado no BAC ($11.62E-12 m^2/s$) do que no BACRFA ($8.21E-12 m^2/s$), que poderá ser devido ao facto dos iões cloreto se fixarem preferencialmente nas fibras de aço e assim, poderá acontecer uma penetração, mais retardada, dos iões na matriz.

Comparando os valores destes coeficientes (LNEC E390) com os de difusão por migração em regime não estacionário (LNEC E463), apresentados nos Quadros 4.24 e 4.25, a tendência é precisamente contrária, visto que se verificou que por migração, o coeficiente de difusão é mais elevado no betão sem fibras. No entanto, o método de avaliação por migração, embora seja mais rápido que o baseado na difusão por imersão, apresenta algumas desvantagens, nomeadamente, o resultado é qualitativo (a diferença de potencial aplicada e a duração do ensaio são definidas pelo Quadro 4.21, que está associado a um ensaio de migração de um provete de betão convencional com uma dosagem normal de ligante, pelo que, poderá não ser aplicável a BRFA) e provoca um aumento de temperatura no betão por ser imposta uma diferença de potencial elevada. Deste modo, é mais prudente utilizar métodos baseados na difusão por imersão para a avaliação de penetração de cloretos no BACRFA, que embora sejam mais morosos, representam melhor o ambiente de exposição real. Importa também referir que os valores dos coeficientes de difusão obtidos por migração ou por imersão foram bastante reduzidos devido à reduzida permeabilidade e porosidade dos betões auto-compactáveis.

Na Figura 4.60 apresenta-se a previsão de penetração de cloretos ao longo dos anos, calculada utilizando o parâmetro de penetração de cloretos, K . Verifica-se que a adição de fibras ao betão não implica uma alteração significativa da penetração dos cloretos com o decorrer do tempo de vida útil das estruturas de betão.

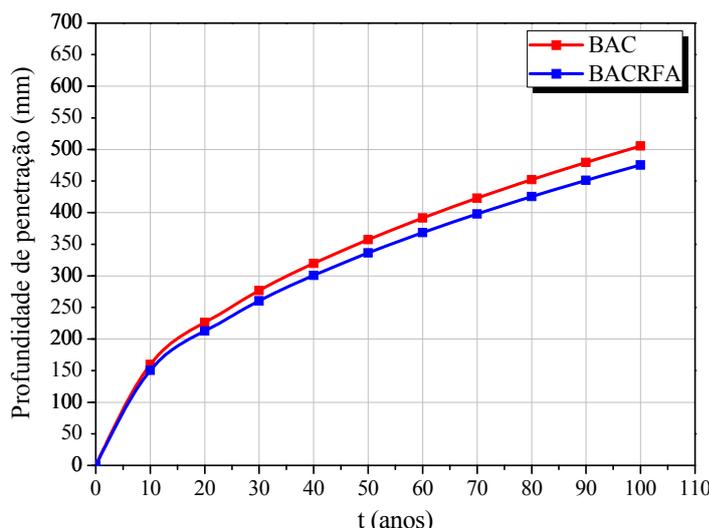


Figura 4.60 - Previsão de penetração de cloretos ao longo dos anos

4.4.7 Carbonatação

A carbonatação é o processo de neutralização da fase líquida intersticial saturada de hidróxido de cálcio e de outros compostos alcalinos hidratados do betão. Como resultado desta reação obtém-se uma diminuição do pH, podendo atingir valores inferiores a 9.

A penetração do dióxido de carbono no betão, em condições de exposição natural, efetua-se numa frente mais ou menos paralela à superfície da peça de betão. Segundo deduções efetuadas a partir da 1ª Lei de Fick, a profundidade atingida é sensivelmente igual à raiz quadrada do tempo, dada pela seguinte expressão:

$$x = K_c \times \sqrt{t} \quad (4.22)$$

em que,

x - Profundidade de carbonatação para um determinado tempo t (mm);

t - Tempo (ano);

K_c - Coeficiente de carbonatação ($\text{mm}\cdot\text{ano}^{-0.5}$).

A velocidade de carbonatação é função de diversas variáveis, incluindo:

- Composição do betão (estrutura porosa do betão tendo por base a razão A/C e a capacidade de fixação do CO_2 pela pasta de betão, nomeadamente com a quantidade de substâncias carbonatáveis - $\text{Ca}(\text{OH})_2$);

- Compactação e Cura;
- Condições de exposição (teor de humidade, concentração de CO₂, temperatura, etc.);

Apesar do CO₂ penetrar no betão seco mais rapidamente na fase de gás, ele não pode reagir por não existir água nos poros. Num betão completamente saturado, o CO₂ tem que se dissolver na solução contida nos poros para depois difundir; e quando os poros estão húmidos, mas não completamente saturados (50 a 80% de humidade relativa), o CO₂ pode alcançar os poros vizinhos e ser suficiente para reagir.

A profundidade de carbonatação é a distância média desde a superfície do betão até à frente de carbonatação. Esta frente é a linha limite da zona, onde o dióxido de carbono reduziu a alcalinidade do material para valores detetáveis pela viragem do indicador de fenolftaleína (entre 8 e 10).

A determinação em laboratório da resistência à carbonatação de um betão, R_{c65} é feita seguindo a seguinte expressão:

$$R_{c65} = \frac{2 \times C_{acel} \times t_1}{X_1^2} \quad (4.23)$$

em que,

R_{c65} - Resistência à carbonatação (kg.ano/m⁵);

X_1 - Profundidade de carbonatação (m);

t_1 - Tempo necessário para atingir um valor de profundidade de carbonatação de X_1 no provete de ensaio (ano);

C_{acel} - 90×10^{-3} kg/m³ - Concentração de CO₂ superior à existente no ar para acelerar o processo de carbonatação.

4.4.7.1 Descrição do ensaio

O ensaio de carbonatação que se realizou teve por base a especificação europeia prCEN/TS 12390-12 (2010). Foram utilizadas uma viga de BAC e uma viga de BACRFA com dimensões de $600 \times 100 \times 100$ mm³. As vigas foram curadas por imersão em água até aos 28 dias, conforme a norma NP EN 12390-2 (2009). Após este período, os provetes foram retirados da água e curados em ambiente de laboratório por 14 dias. Posteriormente, nas vigas foram selados os topos e duas faces opostas com parafina (revestimento isolante), para que o

acesso do CO₂ se fizesse unicamente pela superfície lateral. Após a selagem, colocaram-se os provetes numa câmara de carbonatação com 4.0 ± 0.5 % de CO₂, humidade relativa de 55 ± 5 % e temperatura de 20 ± 2 %. De modo a obter leituras das frentes de carbonatação a diversos tempos ao longo da exposição ao CO₂, as vigas foram retiradas da câmara e extraíu-se uma “fatia”, com cerca de 10 cm de espessura, em cada tempo pretendido, tendo a face de corte da “fatia” extraída sido imediatamente pulverizada com solução de fenolftaleína (Figura 4.61). O topo da viga foi selado de novo com parafina e introduziu-se a restante viga na câmara (Figura 4.62).



Figura 4.61 - “Fatia” partida da viga para análise da profundidade de carbonatação



Figura 4.62 - Exposição da viga na câmara de carbonatação

Devido à reduzida penetração do CO₂ observada nas idades indicadas na especificação aplicável (até 70 dias), optou-se por expor as vigas a um período superior, de 294 dias. Neste caso, foram realizadas leituras das frentes de carbonatação às seguintes idades: 19, 38, 72, 91, 126, 243 e 294 dias (Figura 4.63).

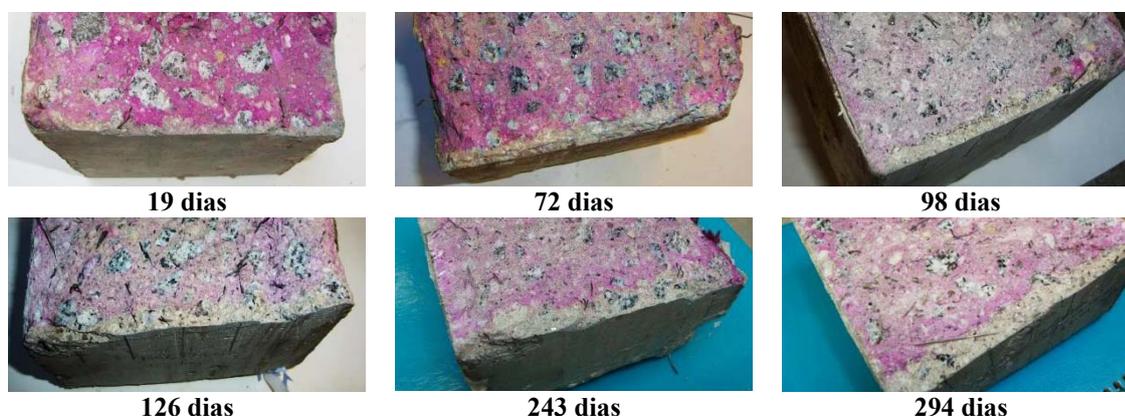


Figura 4.63 - Evolução da profundidade de carbonatação no BACRFA com o tempo de exposição ao CO₂

As leituras foram realizadas medindo a profundidade de carbonatação, perpendicularmente às faces expostas, em 5 pontos centrais igualmente espaçados, em cada face, obtendo um total de 10 leituras por cada fatia de viga.

4.4.7.2 Análise de Resultados

No Quadro 4.31 e nas Figuras 4.64 e 4.65 apresentam-se as leituras obtidas da profundidade de carbonatação nas vigas de BAC e de BACRFA ao longo do período de exposição ao CO₂.

Quadro 4.31 - Profundidade de carbonatação média ao longo do período de exposição

BAC		BACRFA	
t (dias)	$x^2(\text{mm}^2)$	t (dias)	$x^2(\text{mm}^2)$
19	6.23	19	6.43
38	11.36	37	11.59
73	20.29	72	20.94
98	31.58	98	20.99
126	33.10	126	28.32
243	64.93	243	61.47
294	85.95	294	93.78

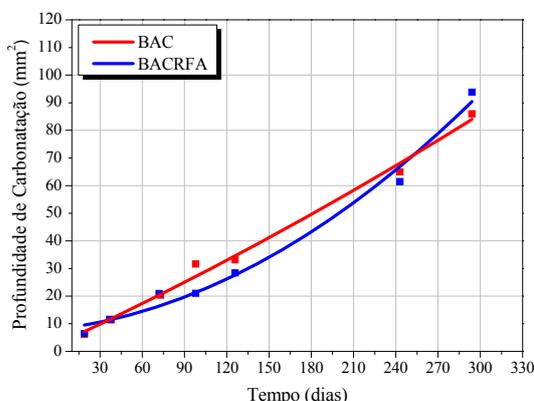


Figura 4.64 - Profundidade de carbonatação vs. tempo de exposição (294 dias)

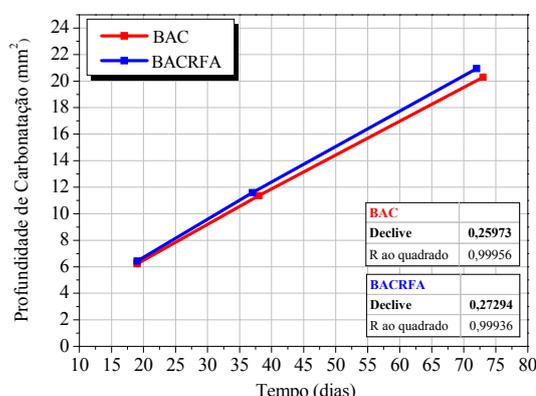


Figura 4.65 - Profundidade de carbonatação vs. tempo de exposição (70 dias)

Na Figura 4.64 verifica-se que a profundidade de carbonatação não tem um comportamento totalmente linear ao longo do período máximo de exposição adotado. No entanto, até 70 dias de exposição (período indicado pela especificação aplicável), verificou-se uma linearidade da penetração do CO₂, conforme se observa na Figura 4.65. Deste modo, até 70 dias de exposição ao CO₂ a equação (4.22) poderá ser aplicável na determinação dos coeficientes de

carbonatação dos betões em estudo, determinando o declive por regressão linear da variação média da profundidade de carbonatação em função do tempo de exposição. Os coeficientes de carbonatação K_c obtidos, foram de $9.74 \text{ mm.ano}^{-0.5}$ para o BAC e de $9.98 \text{ mm.ano}^{-0.5}$ para o BACRFA.

A resistência à carbonatação, R_{c65} , foi determinada pela equação (4.23) (tal como preconizado na especificação LNEC E465), para o período de exposição de 70 dias. Obtiveram-se os valores de R_{c65} de $1774.62 \text{ kg.ano/m}^5$ na viga de BAC, cerca de 4.66% superior à obtida na viga de BACRFA, no valor de $1695.67 \text{ kg.ano/m}^5$, o que significa que a adição de fibras de aço ao betão não provoca uma variação significativa da resistência à carbonatação do betão.

Nas medições da profundidade de carbonatação verificou-se um reduzido aumento da profundidade de carbonatação ao longo do tempo de exposição ao CO_2 devido à reduzida permeabilidade dos betões estudados. Nos betões auto-compactáveis, o betão envolvente é compacto e mais resistente que o betão convencional vibrado, o que proporciona uma maior resistência à carbonatação. Por análise do número de fibras na secção de fratura da viga, a cada tempo de leitura da frente de carbonatação, verificou-se que nas zonas onde há uma maior concentração de fibras, observa-se uma maior resistência à carbonatação.

CAPÍTULO 5

CARACTERIZAÇÃO DA CORROSÃO DAS FIBRAS DE AÇO

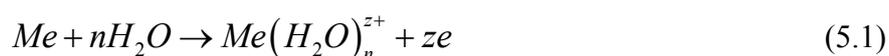
5.1 Introdução

No presente capítulo apresentam-se as metodologias e os resultados obtidos com as técnicas de monitorização eletroquímica da corrosão utilizadas na caracterização da corrosão das fibras de aço. Nos pontos 5.2, 5.3, 5.4.1, 5.4.2 e 5.4.3 apresentam-se algumas noções básicas de eletroquímica e das técnicas experimentais de monitorização da corrosão mais relevantes para este estudo, baseadas na publicação de Wolyneć (2003).

5.2 Noções básicas de Eletroquímica: Equilíbrio

5.2.1 Eléctrodo, Potencial de Eléctrodo e Potencial de Equilíbrio

Quando um metal Me é imerso numa solução aquosa, imediatamente se inicia a reacção de dissolução de um metal, com formação dos iões dentro da solução e com a permanência dos electrões, ze , dentro do metal (5.1). Estes electrões carregam eletricamente o metal criando um campo eléctrico dentro da solução, que faz com que os iões, que são carregados positivamente, tendam a ficar retidos na vizinhança da interface metal-solução.



Após um tempo relativamente curto estabelece-se uma situação de equilíbrio, caracterizada pela formação de uma dupla camada eléctrica. Esta dupla camada eléctrica mostra que na interface metal-solução há uma distribuição de cargas eléctricas, tal que, uma diferença de potencial se estabelece entre o metal e a solução. Um metal que forma uma dupla camada eléctrica é chamado de *eléctrodo*.

Seja φ_{M^o} o potencial do metal e φ_{M^+} o potencial num ponto remoto dentro da solução. A diferença de potencial através da dupla camada eléctrica será:

$${}^o\Delta^+\varphi_M = \varphi_{M^o} - \varphi_{M^+} \quad (5.2)$$

A medida do valor absoluto dessa diferença de potencial é inviável, pois qualquer que seja o sistema de medida adotado, o mesmo implicará a imersão dentro da solução de um terminal metálico, que dará origem a um outro eletrodo. Deste modo, o que é realizado é a medição de uma diferença de potencial relativa em relação a um eletrodo de referência. Qualquer potencial cuja medição seja realizada em relação a um eletrodo de referência é designado de *potencial de eletrodo*, E . Se a dupla camada formada for dependente de uma única reação eletroquímica e se esse eletrodo não estiver ligado eletricamente a nenhum outro eletrodo ou fonte elétrica, então, essa reação atingirá numa fração de segundo o equilíbrio. O potencial de eletrodo em condições de equilíbrio é designado de *potencial de equilíbrio*, E_e .

5.2.2 Potencial de Corrosão

A corrosão em meio aquoso envolve uma reação de natureza anódica de dissolução do metal e, uma outra que ocorre simultaneamente e de forma espontânea, de natureza catódica de redução do oxigénio (solução aquosa aerada) ou redução do hidrogénio (solução aquosa desaerada). Cada uma das reações é caracterizada pelo seu respetivo potencial de equilíbrio e as correspondentes curvas de polarização. Para que ocorra corrosão é essencial que o potencial de equilíbrio da reação anódica de dissolução do metal, E_{Me} , seja menor do que o potencial de equilíbrio da reação catódica, E_H . A situação pode ser visualizada na Figura 5.1, na qual além dos potenciais de equilíbrio estão também representadas a curva anódica do metal, i_a , e a curva catódica de redução do hidrogénio, i_c .

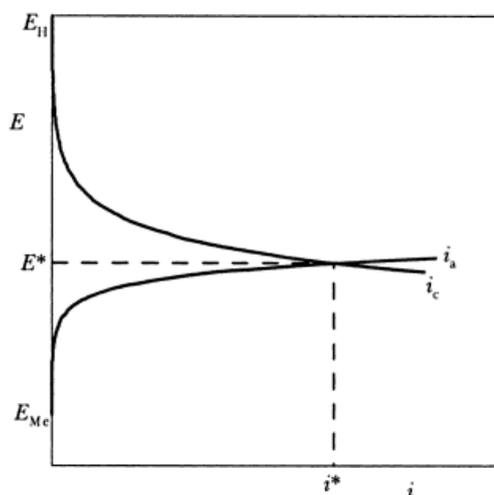


Figura 5.1 - Representação esquemática por meio de curvas de polarização da corrosão de um metal Me numa solução aquosa desaerada. E^* = potencial de corrosão; i^* = densidade de corrente de corrosão

Para que ocorra a corrosão do metal é necessário que os eletrões produzidos pela reação de dissolução do metal sejam utilizados pela reação de redução do hidrogénio. Para que isto ocorra é necessário que a carga elétrica transferida na unidade de tempo da reação anódica seja igual à carga elétrica absorvida na unidade de tempo pela reação catódica. Isto somente é possível quando a densidade de corrente anódica, i_a , da dissolução do metal for igual à densidade de corrente catódica, i_c , da redução do hidrogénio. Para tal, o sistema terá que assumir um potencial de eletrodo intermédio entre os dois potenciais de equilíbrio, E^* ou E_{corr} , que é correspondente à interseção da curva anódica do metal com a curva catódica do hidrogénio. No caso da corrosão, este potencial é designado como potencial de corrosão. A densidade de corrente, i^* ou i_{corr} , correspondente a esse potencial é a densidade de corrente de corrosão, designada também de taxa de corrosão ou velocidade de corrosão.

5.3 Noções básicas de Eletroquímica: Cinética

5.3.1 Curvas de polarização

Quando um eletrodo metálico está em equilíbrio, a reação eletroquímica responsável pela formação da dupla camada elétrica procede, tanto no sentido anódico como no sentido catódico, com a mesma velocidade, i_0 (densidade de corrente de troca). Através dessa camada estabelece-se um potencial de equilíbrio, E_e característico dessa reação. Se por imposição de um potencial externo este potencial for alterado, diz-se então que o eletrodo sofreu polarização. A imposição de um potencial externo ao metal é feita através de um potencióstato. O potencióstato permite impor ao eletrodo qualquer valor desejado de potencial em relação a um eletrodo de referência e medir a corrente de polarização, registando-a em função do potencial. Uma melhor visualização da influência da polarização sobre a densidade de corrente é obtida através da representação gráfica em diagramas de potencial de eletrodo (E) versus densidade de corrente (i). As curvas que se obtêm são chamadas de *curvas de polarização*.

Se o potencial aplicado pelo potencióstato for igual ao potencial de corrosão E^* , nenhuma corrente será detetada pelo aparelho porque a corrente anódica i_a é neutralizada pela corrente catódica i_c . No entanto, num potencial E_a maior que E^* , i_a supera em magnitude o valor de i_c e, neste caso, o potencióstato regista a diferença:

$$\Delta i_a = i_a - |i_c| > 0 \quad (5.3)$$

Do mesmo modo, num potencial E_c menor que E^* , i_c supera em magnitude o valor de i_a e, neste caso, o potencióstato regista a diferença (Wolyneec, 2003) (Figura 5.2):

$$\Delta i_c = i_a - |i_c| < 0 \quad (5.4)$$

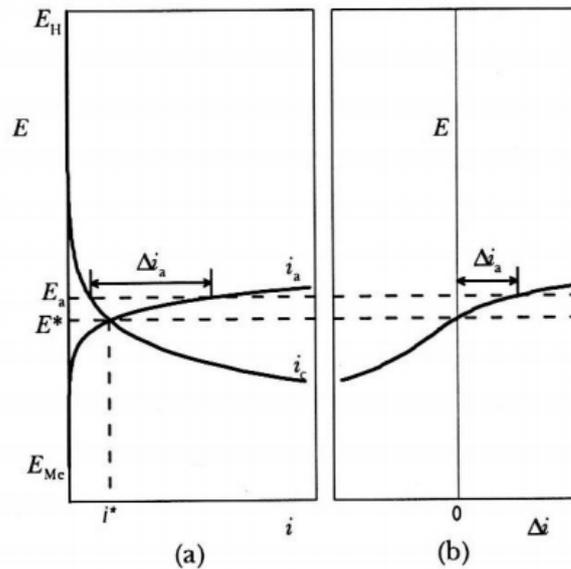


Figura 5.2 - Curva de polarização (b) obtida num potencióstato para um caso de corrosão simples (a)

Num esquema típico de uma curva de polarização, podem ser observadas a polarização catódica e a polarização anódica. Na região catódica, a taxa de dissolução do aço é baixa, devido à predominância de reações catódicas de redução de hidrogénio ($2H^+ + 2e^- = H_2$). Todo o trecho anódico da curva de polarização representa a faixa de potencial na qual pode ocorrer a dissolução anódica (corrosão) do metal ou reações de interface metal / solução, podendo haver redução ou oxidação de compostos da solução utilizada.

A corrente, nas curvas de polarização, é mostrada em valores absolutos, e é dividida pela área de material exposta às reações, criando o conceito de densidade de corrente, i^* .

A velocidade de varredura, a composição da solução, o tempo de imersão, a varredura de potencial e a temperatura de ensaio são parâmetros que influenciam a forma das curvas de polarização.

5.4 Técnicas Experimentais de Monitorização Eletroquímica da Corrosão

A corrosão de fibras de aço manifesta-se com maior frequência em meio aquoso onde o mecanismo da corrosão é essencialmente eletroquímico. Deste modo, técnicas eletroquímicas podem ser utilizadas na avaliação, no controle e na investigação da corrosão de fibras de aço sofrendo ataque corrosivo por iões cloreto.

No âmbito deste trabalho, a resistência à corrosão de fibras de aço foi avaliada através de alguns parâmetros eletroquímicos, nomeadamente, através da realização de ensaios de potencial em circuito aberto, de polarização potenciodinâmica e de polarização linear.

5.4.1 Potencial em Circuito Aberto

O potencial em circuito aberto, E_{OCP} (OCP, do Inglês: *Open Circuit Potential*) é o potencial de corrosão medido em relação a um eléctrodo de referência. O metal cujo potencial vai ser medido, é designado por eléctrodo de trabalho (ET). As extremidades do eléctrodo de trabalho (ET) e do eléctrodo de referência (ER) são conectadas diretamente aos terminais do potencióstato de modo a medir o potencial de corrosão.

Este método caracteriza-se pela monitorização do potencial em relação ao tempo, permitindo deste modo conhecer os potenciais em circuito aberto e o tempo necessário para a sua estabilização.

5.4.2 Polarização Potenciodinâmica pelo método da extrapolação de Tafel

A polarização potenciodinâmica é a técnica para a obtenção de curvas de polarização, e prevê a varredura contínua do potencial a velocidade constante, iniciando-se num potencial onde predominam reações catódicas (menor que o potencial de corrosão). O potencial de eléctrodo é controlado adequadamente com o potencióstato, através do qual é imposto ao eléctrodo o potencial desejado em relação ao eléctrodo de referência e registada a corrente de polarização em função do potencial. Deste modo, obtêm-se as curvas de polarização experimentais.

A extensão da polarização, medida em relação ao potencial de equilíbrio, é chamada de sobretensão ou sobrepotencial, e é normalmente designada por η . Assim, se o potencial resultante da polarização for E , então:

$$\eta = E - E_e \quad (5.5)$$

Se η for positivo tem-se uma polarização anódica e, se η for negativo, uma polarização catódica. A densidade de corrente i varia com a sobretensão η de acordo com a equação de Tafel (5.6):

$$\eta = b - \log \frac{|i|}{i_0} \quad (5.6)$$

Esta equação é de natureza logarítmica, pelo que as curvas de polarização deverão ser representadas num diagrama E vs. $\log|i|$ (Figura 5.3).

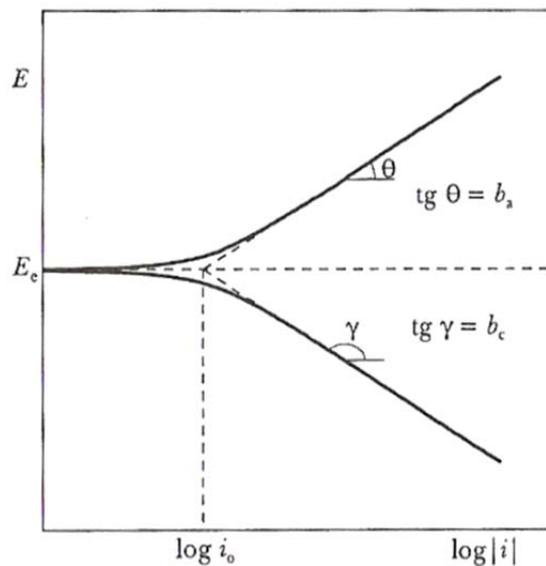


Figura 5.3 - Curvas de polarização anódica (i_a) e catódica (i_c) num diagrama monologarítmico. E_e = Potencial de equilíbrio; i_0 = Densidade de corrente de troca

A vantagem deste diagrama reside no facto de ser reta a parte das curvas em que é válida a equação de Tafel. Além disso, aparecem no diagrama todos os coeficientes da equação: os declives de Tafel anódico e catódico, (b_a) e (b_c), são os declives das retas, enquanto a densidade de corrente de troca, i_0 , é a interseção das retas com o eixo de $\log|i|$ passando pelo potencial de equilíbrio E_e ($\eta = 0$ para $i = i_0$). As retas são traçadas com pontos a partir de $|\Delta E| \geq 30$ mV e os seus coeficientes angulares determinam as inclinações de Tafel (b_a e b_c) resultando equações semelhantes à equação de Tafel, ou seja:

$$\Delta E_a = b_a \log \frac{\Delta i_a}{i^*} \quad (5.7)$$

$$\Delta E_c = b_c \log \frac{\Delta i_c}{i^*} \quad (5.8)$$

A representação das equações num gráfico de E vs. $\log |\Delta i|$ conduz ao gráfico da Figura 5.4, que em sua forma é semelhante ao gráfico da Figura 5.3, no qual o potencial de equilíbrio E_e , a densidade de corrente de troca i_0 e a densidade de corrente i são substituídos pelo potencial de corrosão E^* , pela taxa de corrosão i^* e pela densidade de corrente Δi , respetivamente. Verifica-se, assim, que neste gráfico a extrapolação das retas de Tafel para o potencial de corrosão E^* , determina o valor da taxa de corrosão i^* . Esta é a base do método de extrapolação da reta de Tafel.

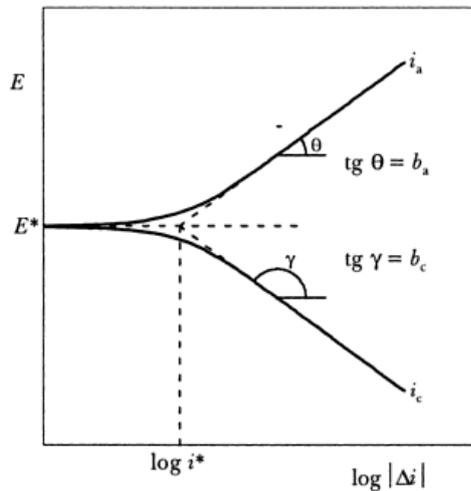


Figura 5.4 - Representação da curva de polarização potenciodinâmica com as inclinações anódicas e catódicas de Tafel

A resistência de polarização, R_p , indica a resistência que um material, exposto a determinado eletrólito, oferece à oxidação quando da aplicação de um potencial externo. Desta forma, um valor alto de R_p indica que o material é mais resistente à corrosão. Um baixo valor indica um alto potencial de corrosão (Kaefer, 2004). R_p pode ser obtida traçando-se o gráfico ΔE vs. Δi através da seguinte relação:

$$R_p = \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial \Delta i} \right)_{\Delta i=0} \quad (5.9)$$

sendo que,

R_p - Resistência de polarização em $\Omega.cm^2$;

ΔE - Variação do potencial de corrosão;

Δi - Variação da densidade de corrente lida para cada variação de potencial.

Desta forma o R_p corresponde ao declive da tangente à curva experimental traçada na Figura 5.5.

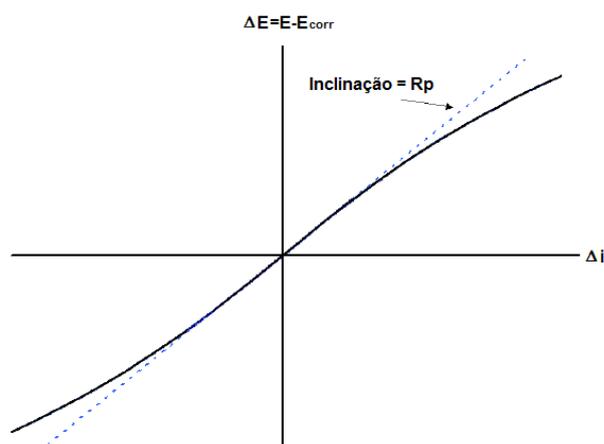


Figura 5.5 - Curva de polarização $\Delta E \times \Delta i$ mostrando a inclinação correspondente ao valor da resistência de polarização

5.4.3 Polarização Linear

A técnica da resistência à polarização linear consiste na aplicação de pequenas variações de potencial, até 50 mV, em torno do potencial de corrosão, de modo a obter respostas em corrente o mais linear possível. O objetivo desta técnica é medir a resistência que um dado material, exposto a determinado meio, oferece à oxidação durante a aplicação de um potencial externo.

A origem desta técnica está associada ao trabalho realizado por Stern e Geary (1957) de desenvolvimento de uma equação para a determinação da taxa de corrosão. A sua conceção é baseada no princípio de que, em torno do potencial de corrosão, as parcelas anódicas e catódicas da corrente global num sistema eletroquímico são iguais, resultando numa corrente global nula. Deste modo, aplicando pequenas diferenças de potencial em torno do potencial de corrosão e medindo as correntes associadas, é possível determinar a resistência de polarização

linear (R_p) do eléctrodo através da equação (5.9), que corresponde ao declive, no potencial de corrosão, da tangente à curva experimental traçada no gráfico ΔE vs. Δi (Wolyneç, 2003).

A densidade de corrente de corrosão, i^* ou i_{corr} , está relacionada com a R_p , através do coeficiente de Stern-Geary, como indicado na equação (5.10):

$$i^* = 10^6 \frac{B}{R_p} \quad (5.10)$$

onde, B é o coeficiente de Stern-Geary.

O coeficiente de Stern-Geary está relacionado com os declives das tangentes anódica e catódica da curva de Tafel, sendo dado pela seguinte equação:

$$B = \frac{b_a b_c}{2.303(b_a + b_c)} \quad (5.11)$$

onde, b_a é o declive de Tafel anódico e b_c é o declive de Tafel catódico.

5.4.4 Materiais

5.4.4.1 Fibras de aço

As fibras de aço utilizadas foram as fabricadas em aço de baixo teor de carbono, possuindo extremidades dobradas, com comprimento $l_f = 60\text{mm}$, diâmetro $d_f = 0.90\text{mm}$, esbelteza $l_f/d_f = 67$ e resistência à tração de 1100 MPa (Figura 5.6).



Figura 5.6 - Fibra de aço de extremidades dobradas

5.4.4.2 Solução Aquosa

Para realizar a imersão das fibras foi utilizada uma solução aquosa com 3.5 % em massa (0.6M (mol/l)) de cloreto de sódio.

5.4.5 Descrição dos Ensaios

Uma célula eletroquímica com um arranjo *standard* de três elétrodos (eléctrodo de trabalho, de referência e auxiliar) foi utilizada nos ensaios eletroquímicos (Figura 5.7). O eléctrodo auxiliar utilizado foi um eléctrodo de platina e todas as medições foram feitas tomando como referência o eléctrodo saturado de calomelano (SCE, do Inglês: *Saturated calomel electrode*). Este eléctrodo é de mercúrio, coberto por uma pasta de Hg_2Cl_2 , cujo eletrólito é saturado com KCl e o seu potencial em relação ao eléctrodo padrão de hidrogénio é igual a +0.242 V.

O equipamento utilizado para os ensaios de monitorização eletroquímica foi um Potencióstato /Galvanóstato (Radiometer, Denmark), controlado pelo software VoltaMaster-4 (Figura 5.8).

Antes dos ensaios, as fibras foram lavadas com água destilada e limpas em propanol e em ultra-sons durante 15 minutos. Este preparativo da fibra teve por objetivo limpar e descontaminar a superfície das fibras, de modo a estas estarem todas nas mesmas condições de exposição durante os ensaios. As fibras de aço foram pesadas antes e depois dos ensaios, a fim de quantificar a perda de massa das fibras por corrosão durante os ensaios (Figura 5.9).

Na superfície da fibra, que não iria estar em contacto com a solução (metade do comprimento), aplicou-se um impermeabilizante (verniz), para que não estivesse sujeita a fenómenos de corrosão.

Foram realizadas 5 séries de ensaios, de acordo com o Quadro 5.1, em que, em cada série foram testadas 4 fibras de aço individualmente nas mesmas condições. Cada fibra, foi imersa em metade do seu comprimento, num recipiente contendo 150 ml de solução de 3.5% NaCl (Figura 5.10).

Quadro 5.1 - Programa de ensaios realizados

Série I	1 hora de imersão → OCP → Polarização Potenciodinâmica
Série II	7 dias de imersão → Pesagem das fibras
Série III	7 dias de imersão → OCP → Polarização Potenciodinâmica
Série IV	1 hora de imersão → OCP → Polarização Linear
Série V	7 dias de imersão → OCP → Polarização Linear

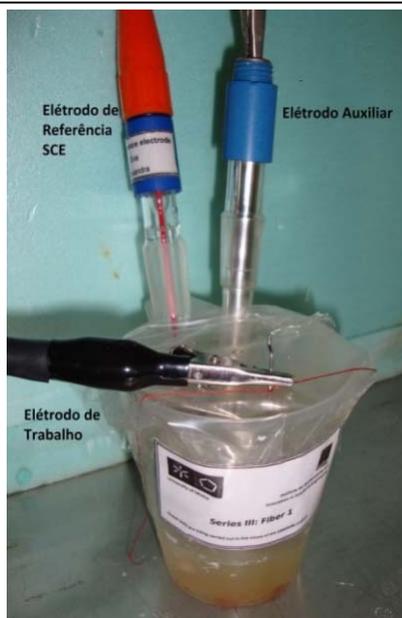


Figura 5.7 - Célula eletroquímica para realização dos ensaios



Figura 5.8 - Potencióstato controlado pelo software VoltaMaster-4



Figura 5.9 - Pesagem das fibras

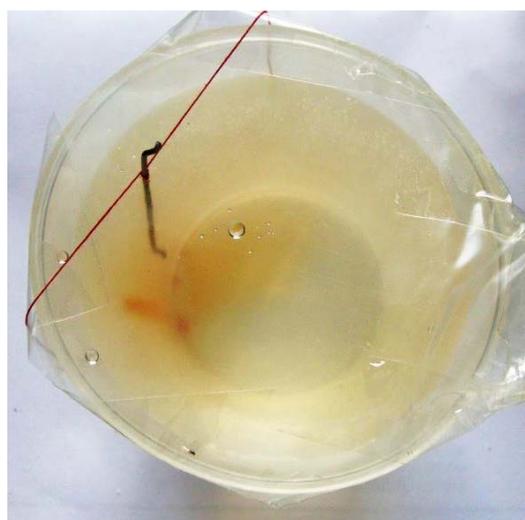


Figura 5.10 - Imersão da fibra na solução

5.4.5.1 Ensaios Série I

Logo após a imersão das fibras na solução, o potencial em circuito aberto, E_{OCP} , foi registado durante 60 minutos, antes dos ensaios de polarização potenciodinâmica (Figura 5.11). Nos ensaios de polarização potenciodinâmica realizou-se uma varredura contínua e ascendente do potencial, desde -300 mV abaixo do valor de E_{OCP} até 1000 mV, a uma velocidade de 0.6 mV/s. A temperatura ambiente foi de aproximadamente $(22 \pm 2) ^\circ\text{C}$.

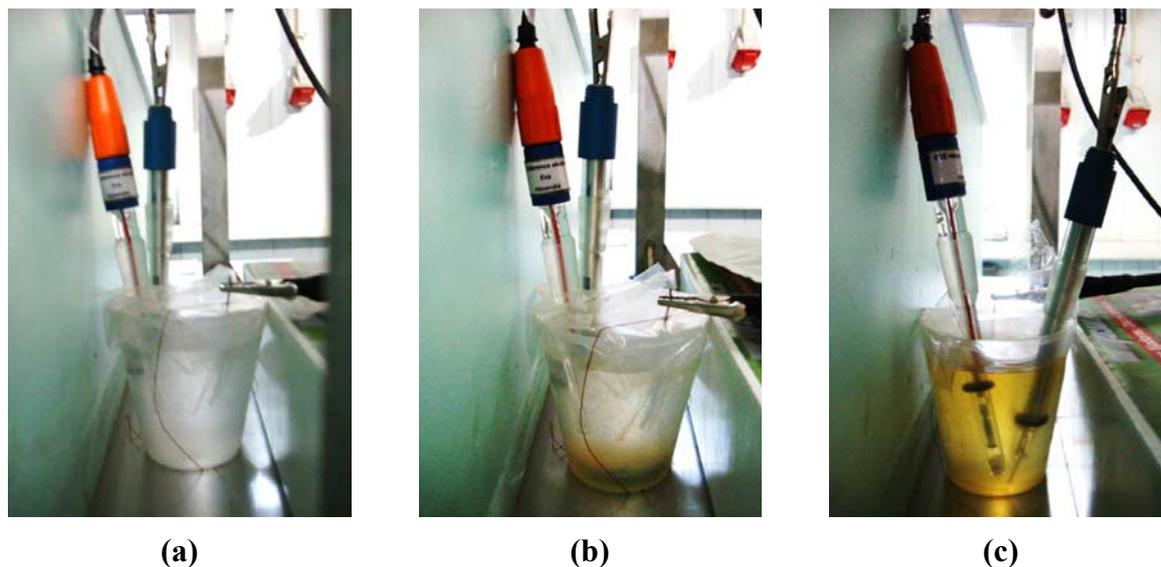


Figura 5.11 - (a) Ensaio OCP e (b) (c) Ensaio de polarização potenciodinâmica

5.4.5.2 Ensaio Série II

Nesta série pretendia-se avaliar a perda de massa que ocorre numa fibra de aço por corrosão após imersão em solução de 3.5% NaCl durante 7 dias (Figura 5.12). Deste modo, as fibras de aço foram pesadas antes e depois do período de imersão. A temperatura ambiente foi de aproximadamente (22 ± 2) °C.



Figura 5.12 - Imersão das fibras de aço em solução de 3.5% NaCl durante 7 dias

5.4.5.3 Ensaio Série III

O potencial em circuito aberto, E_{OCP} , foi registado durante 30 minutos após os seguintes períodos de imersão: 0 horas, 24 horas, 48 horas, 3 dias, 4 dias e 7 dias (Figuras 5.13). Após 7

dias de imersão realizaram-se ensaios de polarização potenciodinâmica, do mesmo modo que foi realizado na Série I. A temperatura ambiente foi de aproximadamente (22 ± 2) °C.



(a)



(b)

Figuras 5.13 - **(a)** Imersão de 24 horas **(b)** Imersão de 48 horas



(c)



(d)

Figura 5.13 - **(c)** Imersão de 3 dias **(d)** Imersão de 4 dias



Figura 5.13 - **(e)** Imersão de 7 dias

5.4.5.4 Ensaio Série IV

Logo após a imersão das fibras na solução, o potencial em circuito aberto, E_{OCP} , foi registado durante 30 min, antes de realizar os ensaios de polarização linear. Nos ensaios de polarização linear realizou-se uma varredura contínua e ascendente do potencial, desde -30 mV até +30 mV do valor de E_{OCP} , a uma velocidade de 0.1 mV/s. A temperatura ambiente foi de aproximadamente (18 ± 2) °C.

5.4.5.5 Ensaio Série V

Colocaram-se as fibras em imersão durante 7 dias e após este período realizaram-se ensaios de polarização linear, de acordo com o mesmo procedimento adotado nos ensaios de polarização linear da Série IV. A temperatura ambiente foi de aproximadamente (19 ± 2) °C.

5.4.6 Análise de Resultados

Nas Figura 5.14 e 5.15 apresentam-se os resultados obtidos nas Séries I e III, das medições do E_{OCP} em função do tempo. Observa-se que na Série I, após 60 minutos as amostras atingem um potencial de corrosão aproximadamente constante, onde se obtiveram valores de potenciais no intervalo de -563 mV a -590 mV. Na Série III verifica-se que o potencial de corrosão diminuiu ao longo de 7 dias de imersão, aumentando a possibilidade de a fibra sofrer corrosão.

No caso das séries III e V, no decorrer dos 7 dias de imersão observou-se na solução o aparecimento crescente de produtos da corrosão, conforme se verifica nas Figuras 5.14.

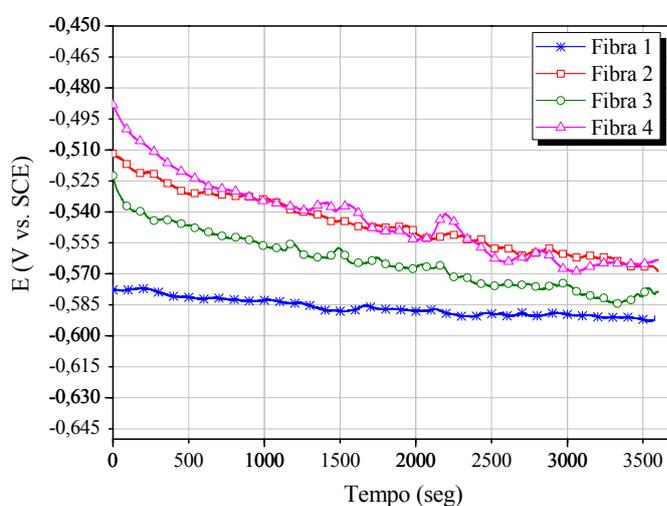


Figura 5.14 - Evolução do E_{OCP} na fibra ao longo de 1 hora de imersão - Série I

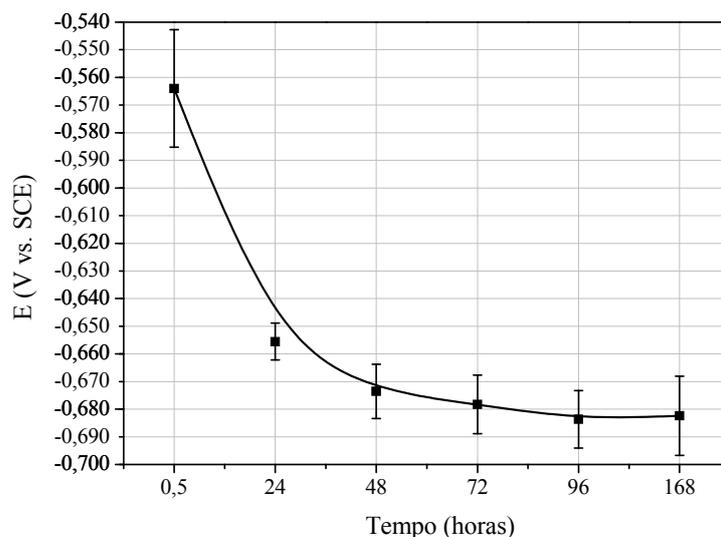


Figura 5.15 - Evolução do E_{OCP} na fibra ao longo de 7 dias de imersão – Série III

De acordo com a monitorização eletroquímica, verificou-se que o E_{OCP} diminui com o tempo de imersão da fibra na solução de 3.5% NaCl (de -540 a -700 mV) o que significa que com o aumento do tempo de imersão, ocorre um aumento da tendência de corrosão das fibras.

De acordo com a ASTM C 876 (1999), os critérios de avaliação das medidas de potencial em armaduras para betão armado, baseado no elétrodo SCE, indicam que a probabilidade de corrosão é superior a 90%, no caso de o E_{corr} ser inferior a -276 mV (Cascudo, 2005). Admitindo-se que o mesmo pressuposto é válido para fibras de aço, pode-se concluir que face aos resultados obtidos de E_{OCP} , inferiores a -276 mV, a probabilidade de as fibras corroerem é superior a 90%, quando imersas em solução de cloretos.

Na Figura 5.16 apresentam-se as curvas de polarização obtidas para a fibra 1 nos ensaios das Séries I e III. As restantes três fibras apresentaram curvas de polarização semelhantes.

No Quadro 5.2, apresentam-se os valores do i_{corr} e do R_p obtidos nos ensaios de polarização potenciodinâmica das Séries I e III.

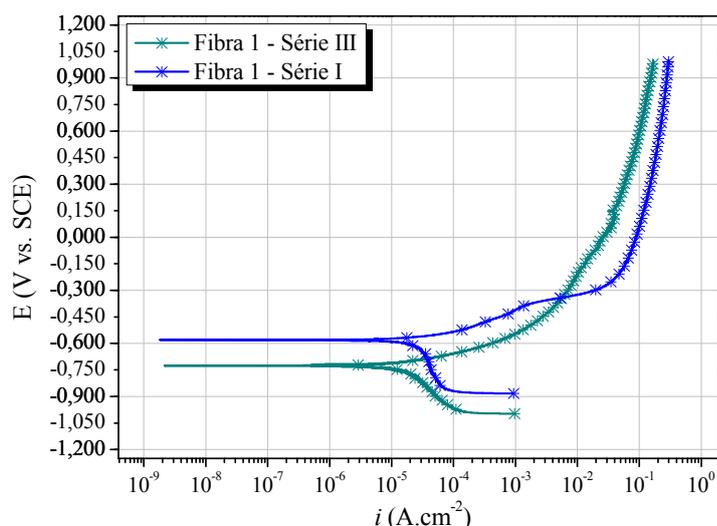


Figura 5.16 - Curvas de polarização potenciodinâmica nas fibras 1 – Série I e III

Quadro 5.2 - Resultados obtidos nos ensaios de polarização potenciodinâmica da série I e III

		$E_{i=0}$ (mV)	i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	R_p ($\text{k}\Omega/\text{cm}^2$)
Série I	Média	-573.5 ± 7.5	10.933 ± 6.490	0.871 ± 0.255
	CoV (%)	1.31	59.37	29.29
Série III	Média	-711.3 ± 15.5	9.659 ± 1.082	4.011 ± 2.878
	CoV (%)	2.19	11.20	71.74

Verificou-se que os resultados da polarização potenciodinâmica apresentavam coeficientes de variação bastante elevados e uma elevada discrepância em termos de valores médios. Por este motivo decidiu-se realizar os ensaios de polarização linear, uma vez que estes são realizados para um intervalo menor de varredura do potencial, e a uma velocidade de varrimento inferior.

Na Figura 5.17 apresentam-se as curvas de polarização obtidas para a fibra 2 nos ensaios das Séries IV e V. As restantes três fibras apresentaram curvas de polarização semelhantes.

No Quadro 5.3 apresentam-se os valores do i_{corr} e do R_p obtidos nos ensaios de polarização linear das Séries IV e V.

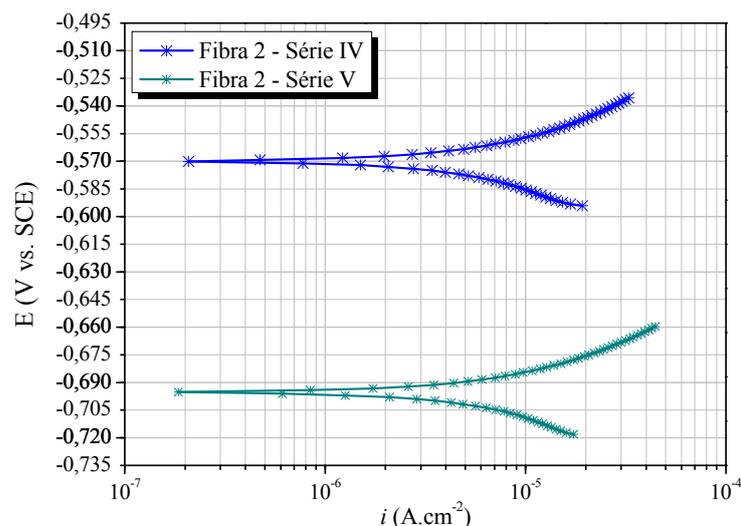


Figura 5.17 - Curvas de polarização linear nas fibras 2 – Série IV e V

Quadro 5.3 - Resultados obtidos nos ensaios de polarização linear da série IV e V

		$E_{i=0}$ (mV)	i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	R_p ($\text{k}\Omega/\text{cm}^2$)
Série IV	Média	-566.5 ± 4.5	1.383 ± 0.123	1.588 ± 0.140
	CoV (%)	0.80	8.93	8.83
Série V	Média	-677.5 ± 21.7	1.207 ± 0.047	1.378 ± 0.049
	CoV (%)	3.20	3.88	3.57

Para a avaliação dos resultados obtidos da densidade de corrente de corrosão, i_{corr} (velocidade de corrosão), adotando os critérios propostos por Alonso e Andrade (1990) e González *et al.* (2004), em que para valores maiores que $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ a corrosão é ativa, verifica-se que as fibras de aço têm tendência para ter um elevado risco de corrosão. Os valores da resistência à polarização, R_p , também confirmam este risco, uma vez que os resultados obtidos são bastante reduzidos.

Com a técnica de polarização linear verificou-se que a variação da densidade de corrente de corrosão, i_{corr} , com o tempo de imersão, assim como a variação da resistência à polarização, R_p , foi pouco significativa.

No Quadro 5.4 apresentam-se os resultados obtidos da perda de massa das fibras após os ensaios realizados das Séries I, II, IV e V. Esta avaliação não foi efetuada na Série III.

Quadro 5.4 - Perda de massa da fibra durante os ensaios (%)

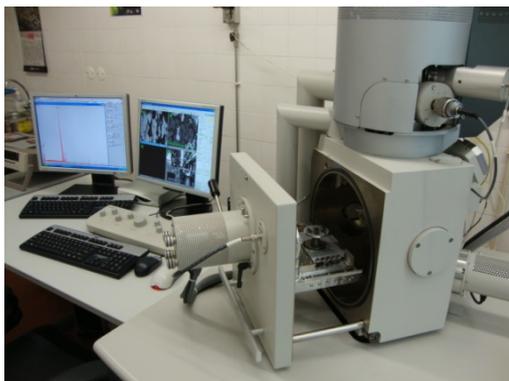
	Série I	Série II	Série IV	Série V
Fibra 1	30.40	0.23	0.39	0.94
Fibra 2	29.66	0.33	0.48	0.45
Fibra 3	24.40	0.46	0.49	0.55
Fibra 4	21.41	0.36	0.64	0.81
Média	26.47	0.34	0.50	0.69
Desvio Padrão	4.30	0.09	0.11	0.23
CoV (%)	16.25	27.26	20.99	32.79

Da avaliação da perda de massa das fibras de aço utilizadas nos ensaios eletroquímicos realizados pode-se concluir que na Série I a perda verificou-se mais elevada devido ao ensaio de polarização potenciodinâmica, onde o potencial induzido na fibra é bastante reduzido ($E_{OCP} -300$ mV) provocando maior corrosão. Na Série II, onde só se realizou imersão das fibras durante 7 dias, verifica-se que a perda de massa da fibra, por redução da secção por corrosão, é pouco significativa. Nos ensaios de polarização linear, a perda de massa também foi pouco significativa, mas maior que na Série II, uma vez que foi induzido um potencial menor que o de OCP ($E_{OCP} -30$ mV), provocando maior corrosão. No entanto, esta foi substancialmente menor do que na Série I.

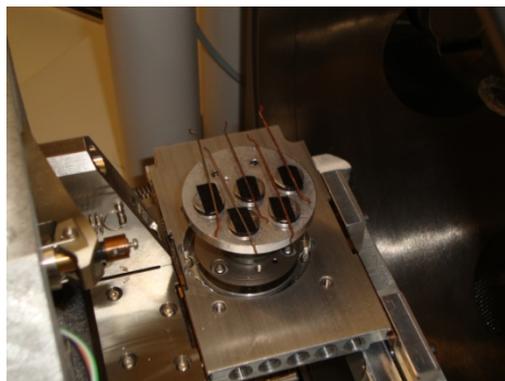
5.4.6.1 Análise microscópica das fibras de aço

Finalizados os ensaios eletroquímicos, foi realizada uma microscopia electrónica de varrimento (MEV) de algumas fibras ensaiadas para caracterização da estrutura superficial da corrosão nas fibras. Estas observações foram realizadas no SEMAT/UM (Laboratório de Serviços de Caracterização de Materiais da Universidade do Minho) no microscópio electrónico de varrimento de ultra alta resolução com emissão de campo, com sistema integrado de microanálise por raios-X e análise de padrões de difração de electrões retrodifundidos (Figura 5.18).

Nas Figuras 5.19, 5.20 e 5.21 apresentam-se micrografias MEV, com ampliação de 200, 1000 e 5000 \times , respetivamente, da visualização da superfície das fibras de aço, com e sem corrosão.

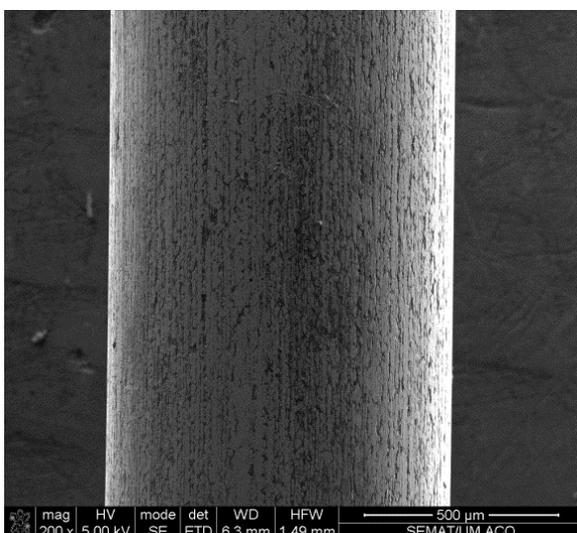


(a)

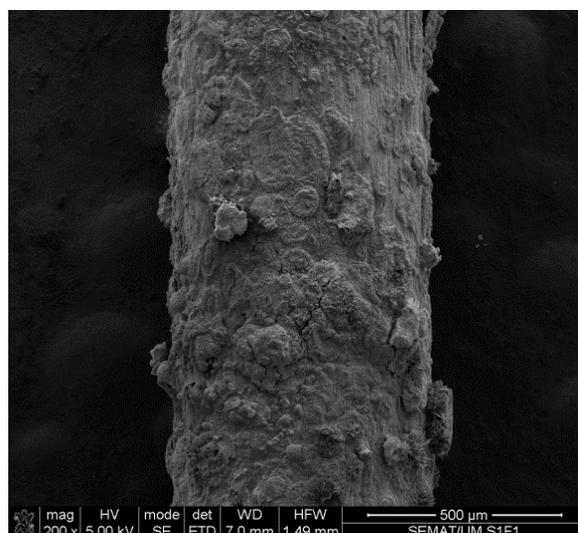


(b)

Figura 5.18 - Microscópio eletrônico de varrimento



(a)



(b)

Figuras 5.19 - Micrografia MEV da superfície das fibras de aço (Ampliação 200×):

(a) Sem corrosão **(b)** Com corrosão – Fibra 1 da Série I

A micrografia presente na Figura 5.19b, de ampliação 200×, permite analisar a topografia e a morfologia da corrosão na superfície das fibras de aço. Conforme verificado, trata-se de uma corrosão generalizada, visto que o grau de corrosão é o mesmo em toda a superfície. Neste caso, também se pode concluir que a velocidade de corrosão é aproximadamente igual em toda a superfície, formando um filme homogêneo de óxidos de ferro.

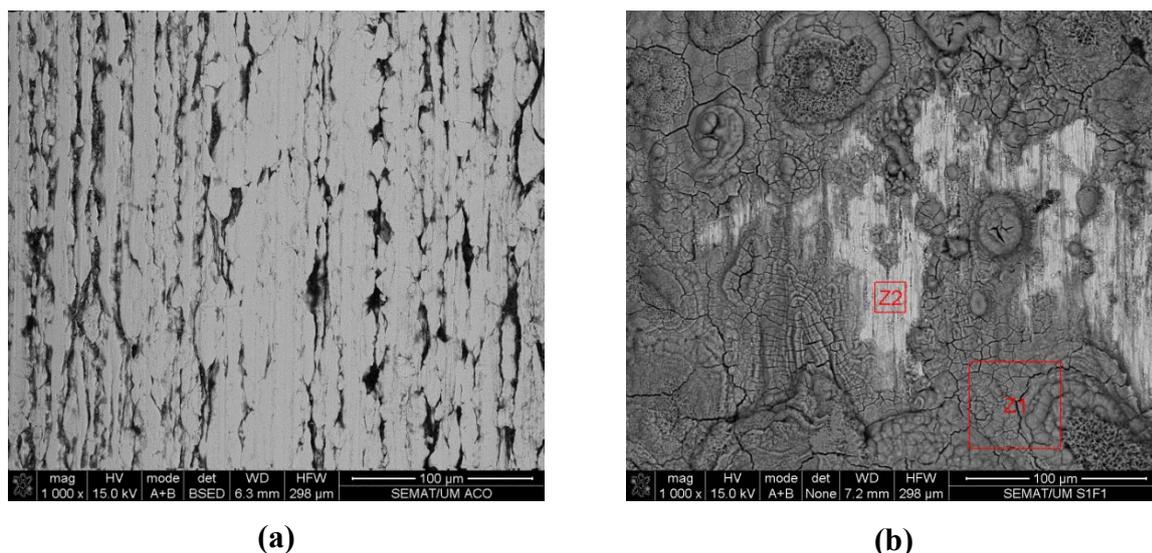


Figura 5.20 - Micrografia MEV da superfície das fibras de aço (Ampliação 1000×):
(a) Sem corrosão (b) Com corrosão – Fibra 1 da Série I

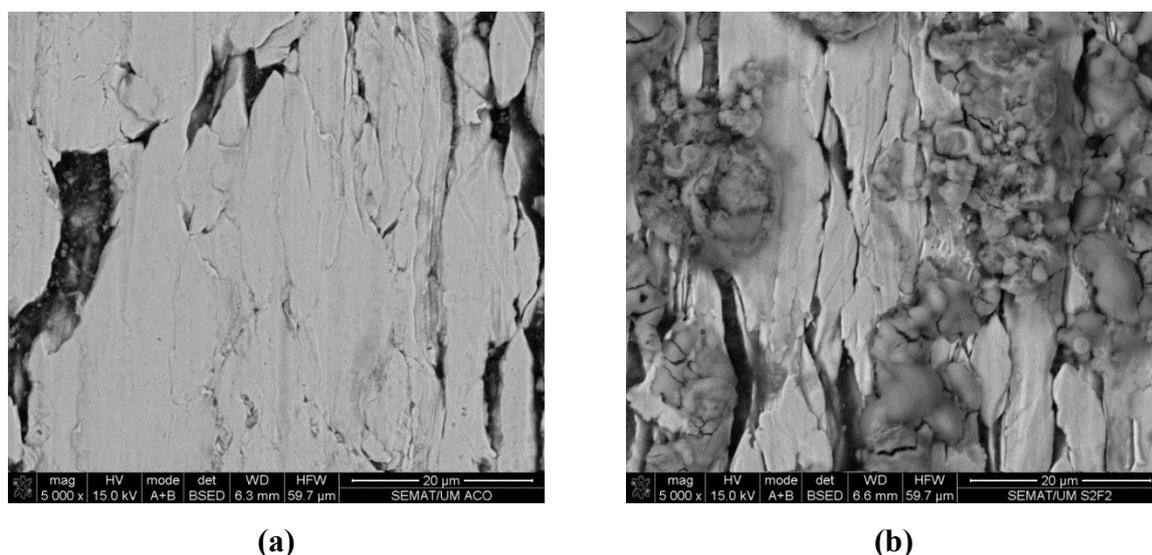


Figura 5.21 - Micrografia MEV da superfície das fibras de aço (Ampliação 5000×):
(a) Sem corrosão (b) Com corrosão – Fibra 2 da Série II

Nas micrografias das Figuras 5.20b e 5.21b observa-se o contraste atómico por elétrons retrodifundidos dos elementos químicos presentes nos produtos corrosivos. Através destas micrografias, realizou-se uma análise química para identificação destes elementos. Nas zonas Z1 e Z2 (Figura 5.20b), os principais elementos químicos identificados foram o carbono, C, o oxigénio, O, e o Ferro, Fe. Os elementos em maior percentagem atómica foram o Ferro (41.96% em Z1 e 79.32% em Z2) e o oxigénio (49.38% em Z1). Estes elementos combinados entre si dão origem ao principal produto da corrosão observado, os óxidos de ferro, em maior concentração na zona Z1 devido à reduzida presença de oxigénio em Z2 (8.45%).

CAPÍTULO 6

COMPORTAMENTO AO ARRANCAMENTO DE FIBRAS DE AÇO SUJEITAS À AÇÃO DA CORROSÃO

6.1 Introdução

No âmbito do estudo da durabilidade do BACRFA, em especial a corrosão das fibras de aço, descreve-se neste capítulo um ensaio experimental desenvolvido para arrancamento de fibras de aço em provetes cilíndricos de BAC fissurados, submetidos previamente a imersão em solução contendo cloretos.

O objetivo deste ensaio consiste em avaliar a influência da corrosão sobre a condição de ligação existente entre a fibra de aço e a matriz cimentícia, através da relação tensão-deslizamento, em provetes de BAC fissurados e expostos a ambiente agressivo contendo cloretos. Os principais parâmetros controladores do fenómeno da corrosão no BRFA são a abertura de fissura e a concentração crítica de cloretos necessária para iniciar a corrosão. Deste modo, ao nível material, pretende-se investigar a corrosão na fibra para diferentes aberturas de fissura do betão e sujeita a um ambiente agressivo contendo cloretos. Ao nível estrutural, pretende-se avaliar a influência da corrosão na fibra sobre o comportamento mecânico do BACRFA fissurado, recorrendo a um ensaio que permite determinar a relação tensão média de deslizamento versus deslizamento.

6.2 Metodologia

A metodologia deste ensaio consistiu em recorrer a um ensaio inovador, não normalizado, e desenvolvido especificamente no âmbito deste programa experimental, com o intuito de avaliar a influência da corrosão na relação tensão/deslizamento do arrancamento da fibra do BAC fendilhado. Para tal, foram utilizados provetes de BACRFA fissurados, com apenas uma fibra de aço atravessando a superfície de fratura. Os provetes foram submetidos a imersão em solução de 3.5% NaCl para induzir a corrosão na fibra por penetração de cloretos e, posteriormente, foram submetidos a ensaio de arrancamento da fibra do betão.

6.2.1 Parâmetros em estudo

A influência da abertura de fissura, e , foi estudada através de distintas aberturas nos provetes, nomeadamente, 0.1mm, 0.3 mm e 0.5 mm. No estudo foram também considerados provetes sem abertura de fissura.

No que diz respeito à espessura de recobrimento da fibra, foi considerada uma distância da fibra à face do provete no valor de 10 mm.

Para este ensaio foi adotado um período de imersão dos provetes de 10 dias em solução de 3.5% NaCl, com o intuito de induzir corrosão na fibra. No entanto, inicialmente estava previsto realizar ciclos de imersão/secagem dos provetes na solução, mas após um teste preliminar, verificou-se que os ciclos geravam uma condição demasiado agressiva para as fibras, levando a que a corrosão fosse muito intensa, causando a redução da sua secção e a sua consequente rotura, quando se realizava o arrancamento.

Os provetes com abertura de fissura foram submetidos a tensão constante durante todo o período de imersão na solução, de forma a simular com maior realismo as condições julgadas representativas de elemento estrutural de BARFA fissurado sob carregamento. Os provetes sem abertura de fissura foram imersos sem tensão aplicada, dado que se o BRFA não tiver fissuras os mecanismos de reforço das fibras não são mobilizados. Para cada valor de abertura de fissura a estudar foram considerados 3 provetes, ensaiados simultaneamente nas mesmas condições.

A Figura 6.1 sintetiza as variáveis envolvidas neste ensaio e resume os estados de tensão, as aberturas de fissura, a distância entre a face do provete e o posicionamento da fibra (recobrimento) e o número de provetes considerados neste ensaio experimental.

Neste ensaio, também foram utilizados provetes de referência que não foram sujeitos a imersão em solução de 3.5% NaCl. Estes provetes, com abertura de fissura mínima (aproximadamente 0.1mm), foram mantidos em ambiente de laboratório, não tendo sido submetidos a condições ambientais de geração acelerada de corrosão.

Finalizado o período de 10 dias de imersão dos provetes, foram realizados os ensaios de arrancamento das fibras, incluindo os provetes livres do fenómeno de corrosão para servirem de termo de comparação.

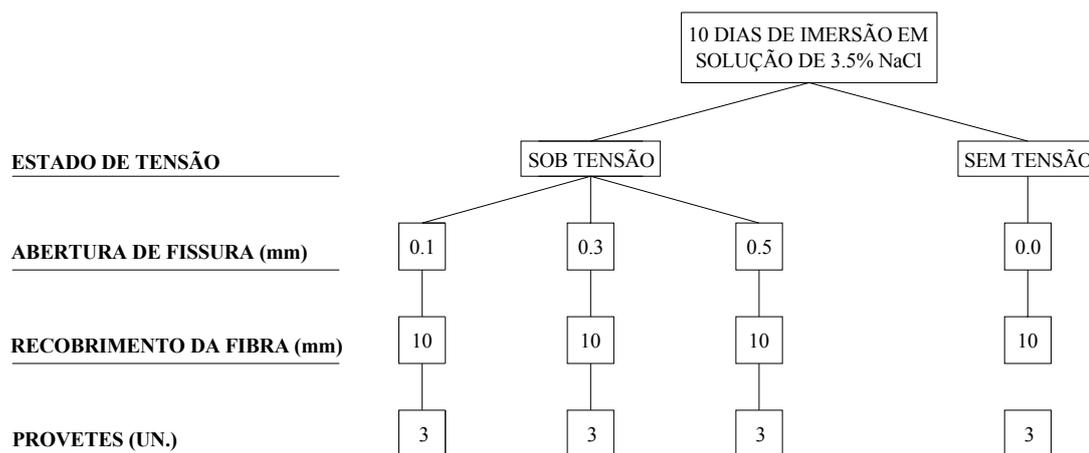


Figura 6.1 - Variáveis envolvidas no ensaio

6.2.2 Produção dos Provete

Para este ensaio foram moldados provetes cilíndricos, com dimensões de 88 mm de diâmetro e 160 mm de altura, com apenas uma fibra de aço e com BAC, de acordo com a composição indicada no Quadro 3.10. As fibras de aço utilizadas foram as apresentadas no ponto 5.4.4.1.

De modo a criar um provete com uma pseudo-fissura, estes foram moldados em duas fases, em que metade do provete foi betonado em cada fase (80 mm de altura) (Figura 6.2).

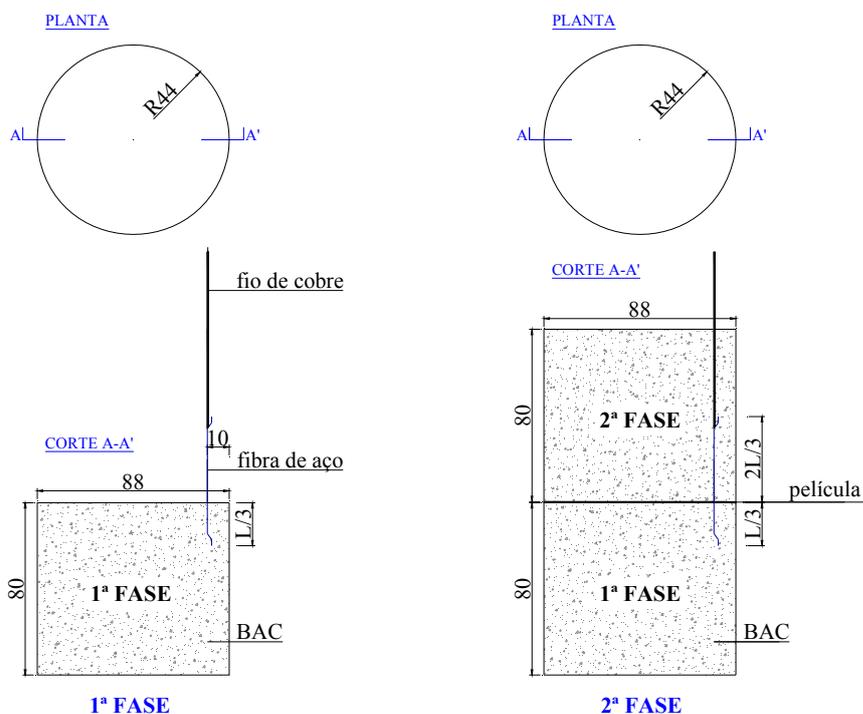


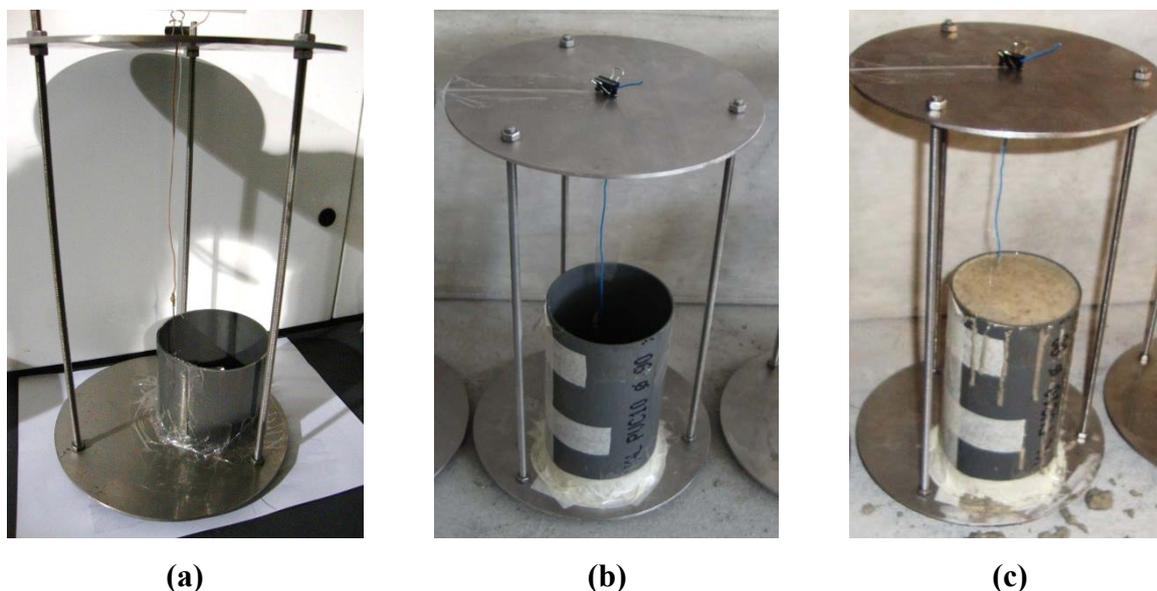
Figura 6.2 - Aspeto do provete na 1ª e 2ª Fase

A fibra foi embebida na 1ª Fase, cerca de 1/3 do seu comprimento, e o restante foi embebido na 2ª Fase, de modo a que o arrancamento se processasse apenas por um lado, o de menor comprimento de embebimento.

Antes da betonagem da 2ª fase, foi aplicada na face de contacto entre as duas partes uma película aderente de reduzida espessura, de modo a impedir a adesão entre as partes e auxiliar na demarcação e controlo da abertura de fissura, e .

De modo a monitorizar eletroquimicamente a corrosão da fibra no período de imersão do provete, um fio de cobre revestido foi soldado à fibra de aço, tendo a região junto ao ponto de soldadura sido impermeabilizada com cera de abelha. Este fio de cobre revestido tem a outra extremidade fora do provete e com comprimento suficiente para ficar fora da solução durante o período de imersão.

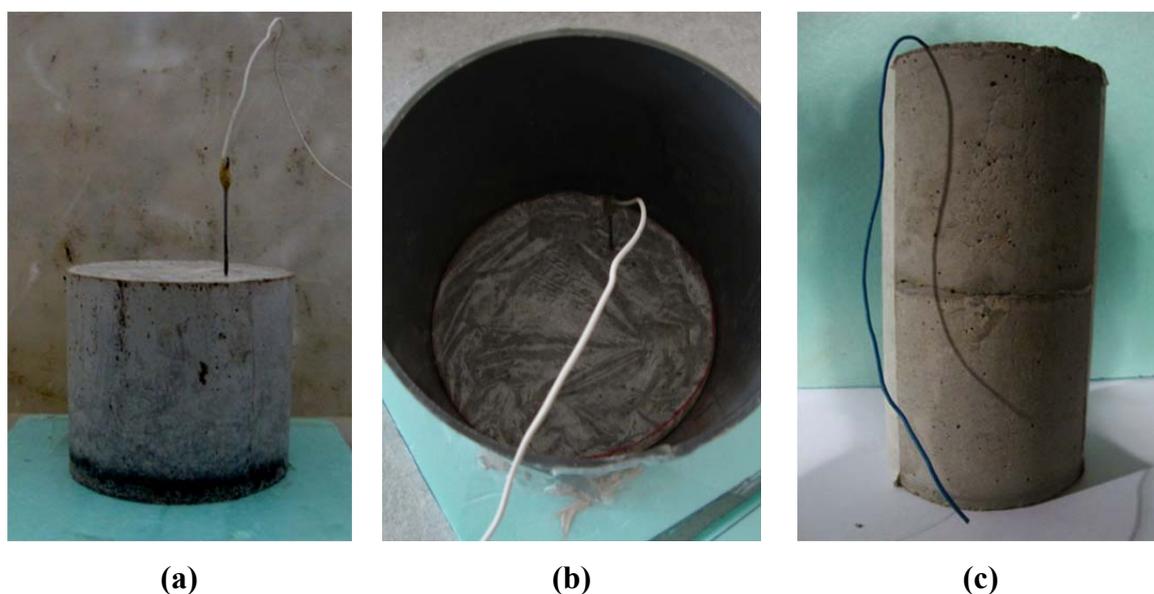
Aquando do fabrico dos provetes, o posicionamento da fibra foi garantido com o auxílio de uma estrutura auxiliar constituída por 2 chapas de aço e 3 varões roscados que permite posicionar a fibra na altura pretendida e com o recobrimento desejado, conforme apresentado nas Figuras 6.3.



Figuras 6.3 - Estrutura auxiliar utilizada para posicionamento da fibra no provete de betão

(a) 1ª FASE (b) e (c) 2ª FASE

Na 1ª Fase utilizou-se um molde em PVC com 80 mm de altura e moldou-se o provete com 1/3 do comprimento da fibra embebido. Posteriormente, na 2ª Fase, desmoldou-se o provete moldado na 1ª Fase e introduziu-se o provete no molde da 2ª Fase, que possui a altura total de 160 mm. O aspeto do provete na 1ª e 2ª Fase pode ser observado nas Figuras 6.4.



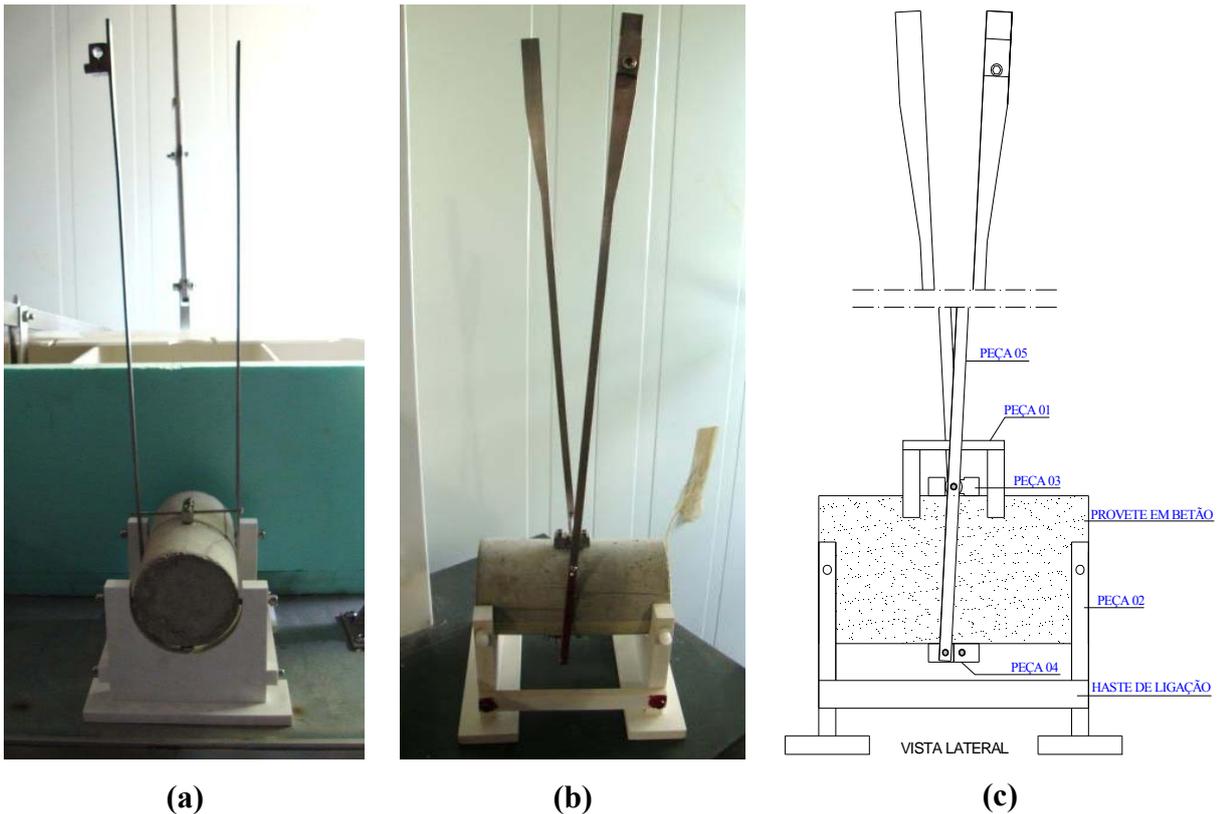
Figuras 6.4 - Aspeto do provete (a) 1ª FASE (b) Aplicação da película (c) 2ª FASE

6.2.3 Execução da fissura

As fissuras previstas foram executadas nos provetes após 28 dias de cura e antes destes serem submetidos a imersão em solução de 3.5% NaCl.

Antes de executar as fissuras, os provetes foram colocados e fixados nos suportes de apoio, dentro dos reservatórios onde decorreu a imersão, a fim de minimizar a ocorrência de erros devidos ao deslocamento. Para além disso, foram também fixados ao provete, uns pantógrafos para medição da abertura de fissura ao longo do período de imersão. Na Figura 6.5 apresenta-se as configurações do suporte de apoio dos provetes e do sistema de fixação dos pantógrafos.

De acordo com a Figura 6.5, a configuração do sistema de colocação e fixação de cada provete no suporte de apoio e a fixação dos pantógrafos ao provete é constituído por 5 peças.



(a) (b) (c)
Figura 6.5 - Sistema de apoio dos provetes e fixação dos pantógrafos
(a) Vista frontal (b) e (c) Vista lateral

A peça 01, centrada com o provete, suporta a carga aplicada definida e distribui-a para dois pontos do provete, igualmente distanciados entre si, como forças concentradas (Figura 6.6).

A peça 02 garante a estabilidade ao provete durante todo o ensaio, nomeadamente durante o período de imersão. De modo, a aumentar a estabilidade, são fixas ao suporte duas hastes de ligação (Figura 6.7).



Figura 6.6 - Peça 01

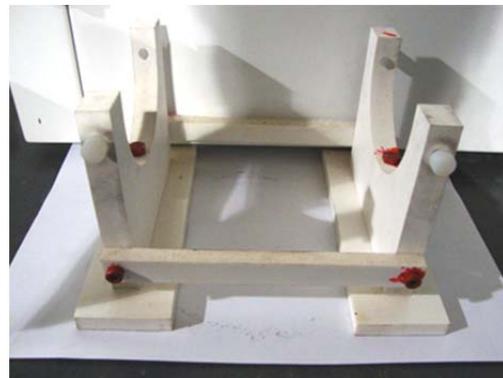


Figura 6.7 - Peça 02

A peça 03 é fixada à parte superior do provete através de fixação mecânica, e funciona como uma rótula para o sistema, além de servir de suporte às peças 05 (Figura 6.8).



Figura 6.8 - Peça 03

As peças 04 são fixas à parte inferior do provete por colagem e servem, também, para dar estabilidade às peças 05. Neste caso, cada peça 04 é fixa a uma parte do provete, de modo a permitir avaliar o deslocamento entre ambas as partes (Figuras 6.9a e 6.9b). Estas peças, por serem metálicas e por estarem em contacto com a solução durante a imersão do provete, foram impermeabilizadas com verniz e, depois de coladas, foram vedadas com silicone, de modo a não se descolarem por efeito da solução (Figura 6.9c).

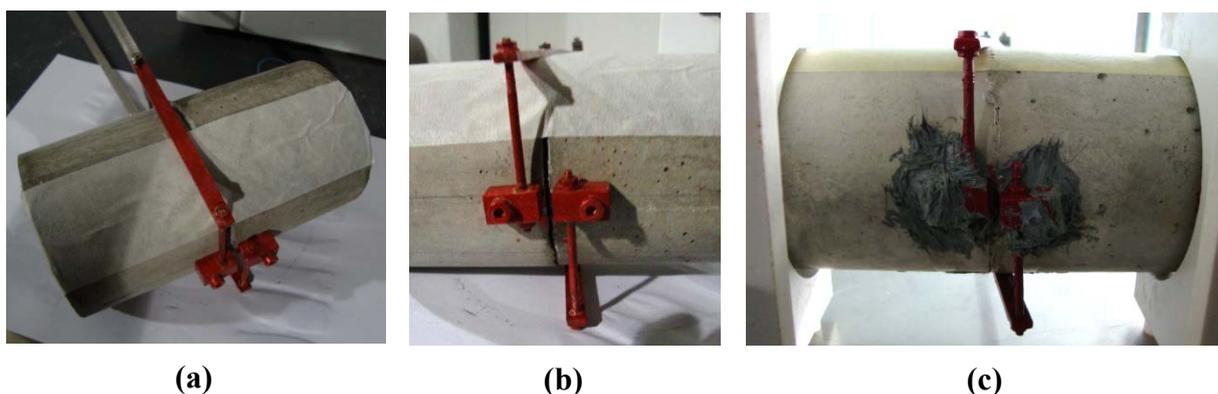


Figura 6.9 - Aspeto das peças 04

As peças 05 servem de suporte aos comparadores mecânicos que permitem medir a abertura de fissura antes e ao longo do período de imersão. Foram utilizados comparadores mecânicos exteriores, referência MarCator 810 SRM da Mahr, com leitura de 0.001 mm (Figura 6.10c).

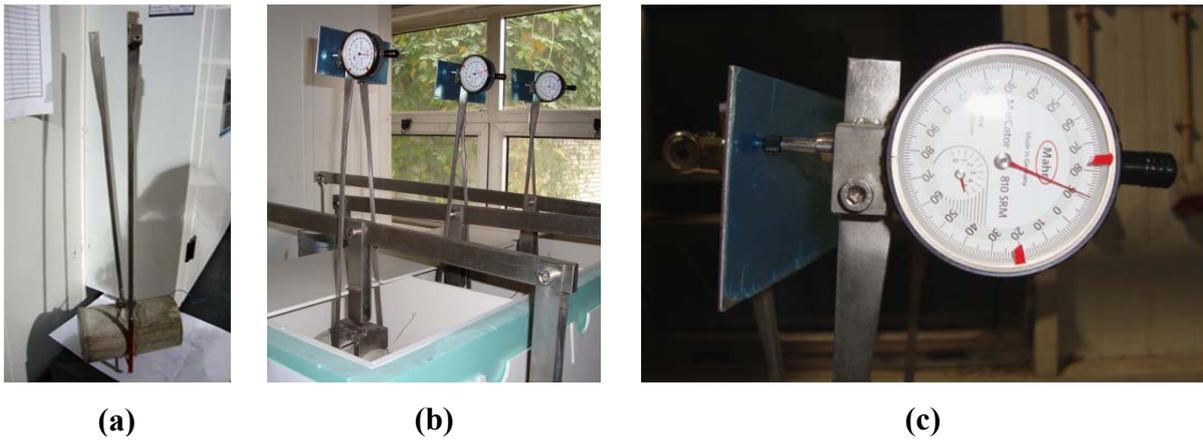


Figura 6.10 - Fixação dos comparadores mecânicos nos pantógrafos

A execução das fissuras nos provetes foi realizada por intermédio de um sistema de aplicação de carga, após a colocação dos provetes no interior do reservatório. Este sistema de aplicação de carga consiste em adicionar carga à extremidade do sistema de alavanca, até que a força exercida no provete provoque a abertura de fissura pretendida, medida pelo comparador mecânico (Figuras 6.11). Esta força é mantida constante durante o período de imersão.

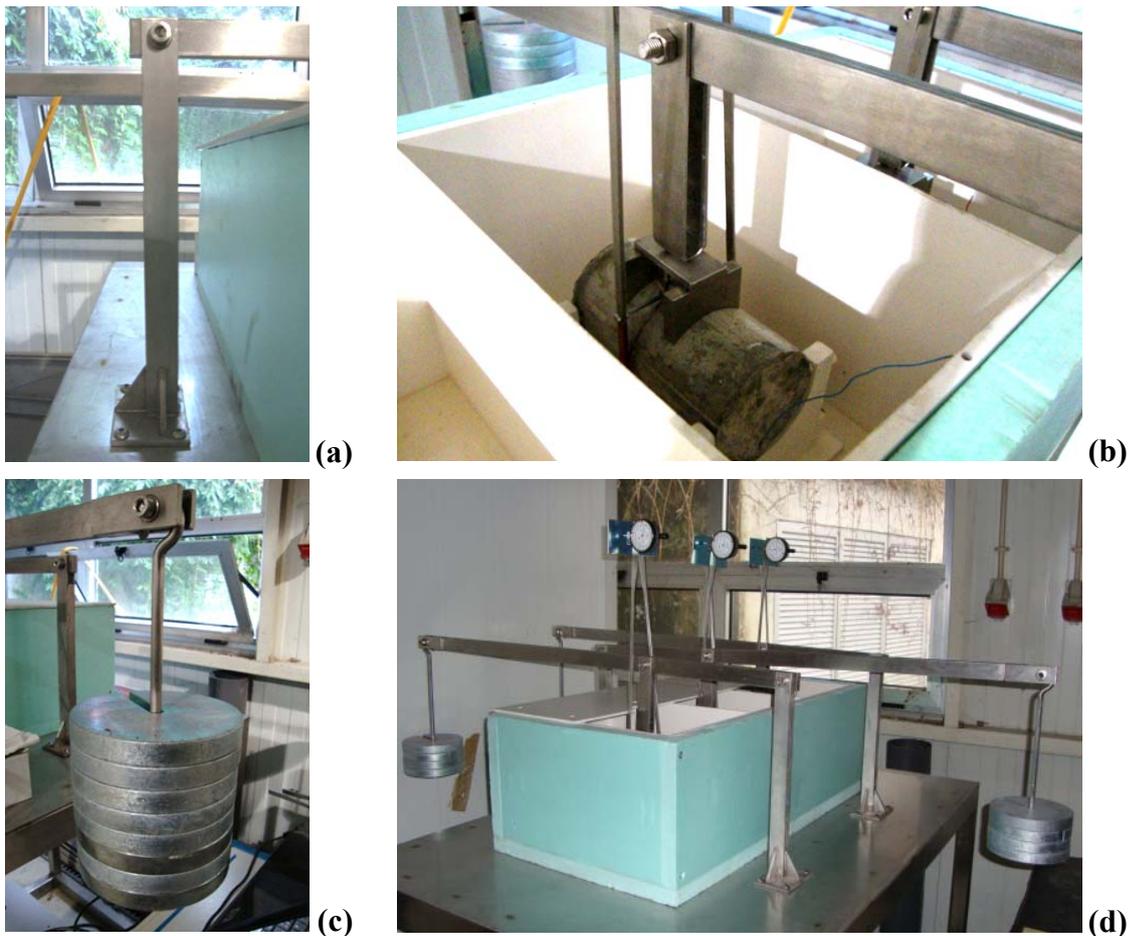


Figura 6.11 - Sistema de aplicação de força

No Anexo I, encontram-se as peças desenhadas de todos os elementos constituintes do equipamento desenvolvido para este ensaio.

6.2.4 Imersão em Solução 3.5% NaCl

Após execução da abertura de fissura pretendida, os provetes foram submetidos a 10 dias de imersão em solução de 3.5% NaCl no reservatório 1 (Figuras 6.12). O objetivo desta imersão é acelerar o processo de corrosão da fibra de aço, simulando um ambiente de agressividade superior à que o betão pode estar sujeito quando está em ambiente marítimo.

Importa referir que os reservatórios são compartimentados em 3 divisões, cada um destinado a um provete. A razão desta compartimentação deve-se à necessidade de possuir soluções independentes para imersão de cada provete, de modo a não provocar influência nos processos de corrosão de cada fibra.



Figura 6.12 - Imersão dos provetes no Reservatório 1

6.2.4.1 Ciclos de Imersão/Secagem

Conforme já referido, antes de restringir as condições de agressividade ao processo constituído apenas por imersão, foi realizado um ensaio preliminar composto por ciclos de imersão/secagem numa solução de igual concentração de NaCl. Os ciclos foram realizados por intermédio de um sistema de bombagem entre o reservatório 1, onde estão colocados os provetes, e o reservatório 2 (Figura 6.13), onde são colocadas as soluções e as bombas de elevação da solução (Figura 6.14).



Figura 6.13 - Reservatório 2



Figura 6.14 - Sistema de bombagem

Cada ciclo de imersão/secagem foi composto por 7 dias, 3 dias de imersão em solução de NaCl e 4 dias de secagem em ambiente de laboratório. Foram realizados 10 ciclos de imersão/secagem em solução 3.5% NaCl durante 2 meses. No entanto, ao longo deste período a corrosão da fibra foi muito intensa, provocando a redução da sua secção e a consequente rotura (Figura 6.15). Deste modo decidiu-se optar por fazer apenas 10 dias de imersão, por ser menos agressivo e por se ter um melhor controlo do processo de corrosão, sem interferência de erros causados pelo período de secagem.



(a)



(b)

Figura 6.15 - Rompimento da fibra de aço devido à ação da corrosão

6.2.5 Monitorização Eletroquímica

Durante o período de imersão dos provetes (10 dias), o comportamento da fibra foi monitorizado dentro do provete através de medidas eletroquímicas, nomeadamente através da realização de ensaios de potencial de circuito aberto. Estes ensaios foram realizados em 3 provetes, em cada dia de imersão. A célula eletroquímica adotada foi a descrita no ponto

5.4.5. O potencial em circuito aberto (E_{OCP}) foi registado durante 20 minutos em cada provete.



Figura 6.16 - Célula eletroquímica para realização do ensaio OCP

6.2.6 Arrancamento da fibra

Finalizado o período proposto para imersão dos provetes, foram realizados os ensaios de arrancamento das fibras ao betão. O arrancamento da fibra foi realizado por flexão sob quatro pontos de carga nos provetes, aplicando carga até que a força exercida sobre o provete provocasse o arrancamento da fibra do betão. Os ensaios foram realizados numa prensa servo-controlada de elevada precisão, sob controlo de deslocamento a meio vão com uma velocidade de deformação de 0.001 mm/s. Os provetes foram colocados sobre apoios de roletes, específicos para provetes cilíndricos com aquelas dimensões, com um vão livre de 160 mm. A carga aplicada foi medida com recurso à célula de carga e a abertura de fissura foi lida na boca da fissura, através de um transdutor de deslocamentos posicionado perpendicularmente a esta (Figura 6.17).

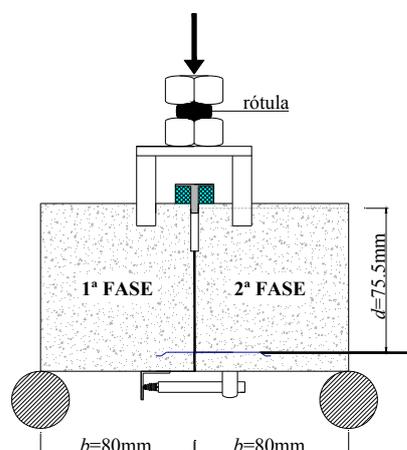


Figura 6.17 - Configuração do ensaio de arrancamento de fibras de aço

O ensaio de arrancamento da fibra, permite obter a relação força aplicada versus abertura de fissura ao nível da face exterior do betão. A força de arrancamento na fibra foi determinada por intermédio da seguinte expressão:

$$F_a \times b = F_f \times d \quad (6.1)$$

sendo que,

F_a - $\frac{1}{2}$ da força aplicada a meio vão;

b - Distância do apoio do provete ao meio vão (80 mm);

F_f - Força de arrancamento ao nível da fibra;

d - Distância da fibra ao topo superior do provete (75.5 mm).

De modo a garantir o binário subjacente à equação (6.1) utilizou-se um elemento em aço na face superior do provete de modo a transmitir as forças de compressão geradas na secção (Figura 6.18b). O deslizamento na fibra foi obtido com base no deslocamento lido no LVDT e tendo em conta a posição relativa entre a fibra e o eixo do LVDT, aplicando uma lei de transformação geométrica suportada no princípio que os dois corpos rígidos que formam o provete rodam em torno do ponto de contato do elemento de aço acima indicado.

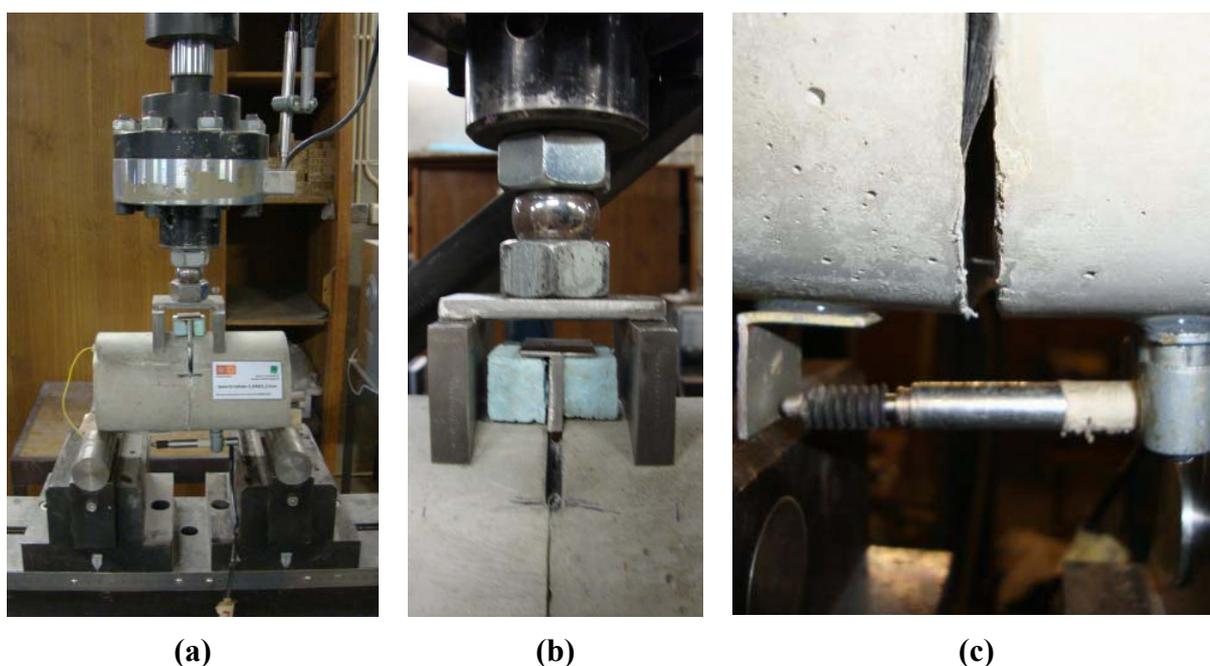


Figura 6.18 - Ensaios de arrancamento de fibras de aço

Na Figura 6.19 apresenta-se o aspeto das fibras de aço após o arrancamento dos provetes para as aberturas de fissura em estudo.

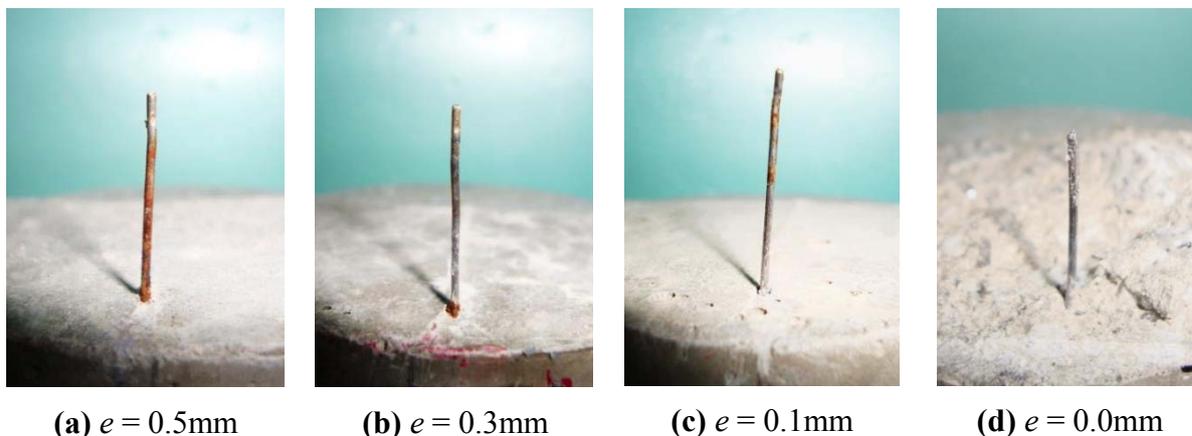


Figura 6.19 - Aspeto das fibras após ensaio de arrancamento

6.2.7 Análise de Resultados

Na Figura 6.20 apresenta-se a variação do E_{OCP} nas fibras de aço, ao longo do período de imersão dos provetes com distintas aberturas de fissura, 0,5, 0,3, 0,1 mm e sem fissura.

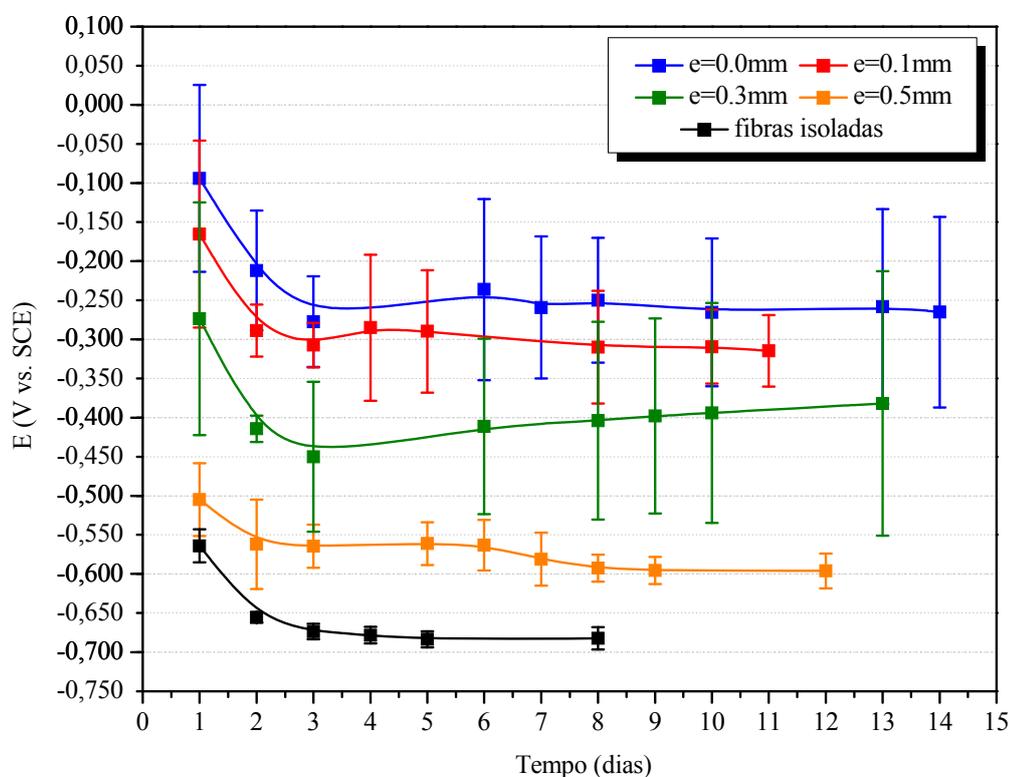
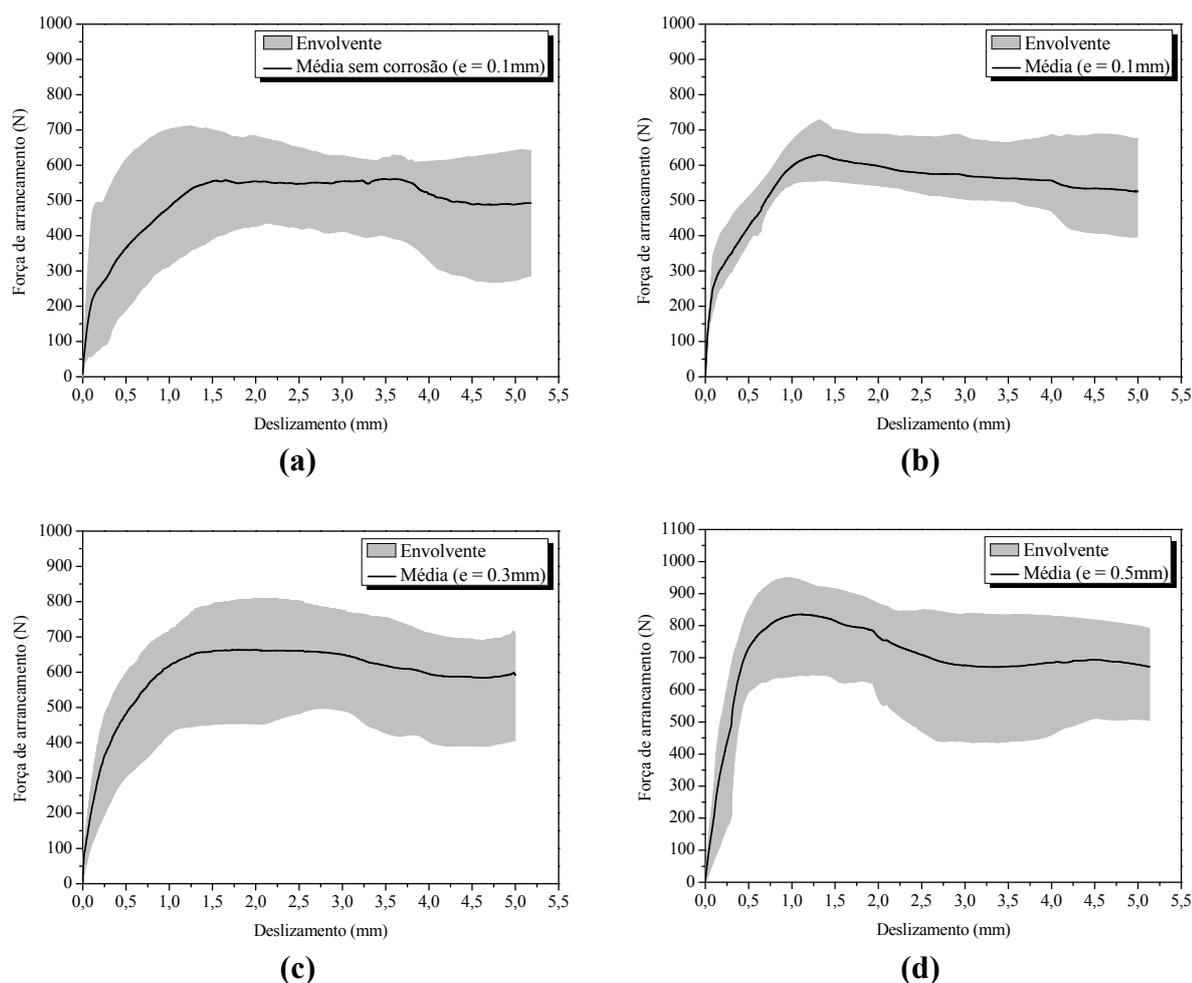


Figura 6.20 - Evolução do potencial em circuito aberto da fibra ao longo do período de imersão e em função da abertura de fissura do provete

Observa-se que o potencial de corrosão diminuiu com o aumento da abertura de fissura, o que significa que quanto maior a abertura de fissura, maior a possibilidade de a fibra sofrer corrosão. Na Figura 6.20, se compararmos o potencial em circuito aberto ao longo do tempo, da fibra no provete sem fissura (sem corrosão) com o da fibra isolada (intensa corrosão), verifica-se que na fibra totalmente embebida na matriz cimentícia, o risco de corrosão é reduzido visto que o E_{OCP} aumentou, o que enfatiza o efeito de proteção à corrosão que a matriz cimentícia provoca na fibra. Verifica-se também que o desvio padrão das medições diminuiu com o aumento da abertura de fissura, provavelmente, devido ao aumento da área da fibra em contacto direto com a solução.

Nas Figuras 6.21 e 6.22 apresentam-se os gráficos Força de arrancamento versus Deslizamento obtidos para o arrancamento das fibras dos provetes fissurados para as aberturas de fissura em estudo.



Figuras 6.21 - Relação Força de arrancamento (média, mínimo e máximo) versus Deslizamento das fibras para as distintas aberturas de fissura

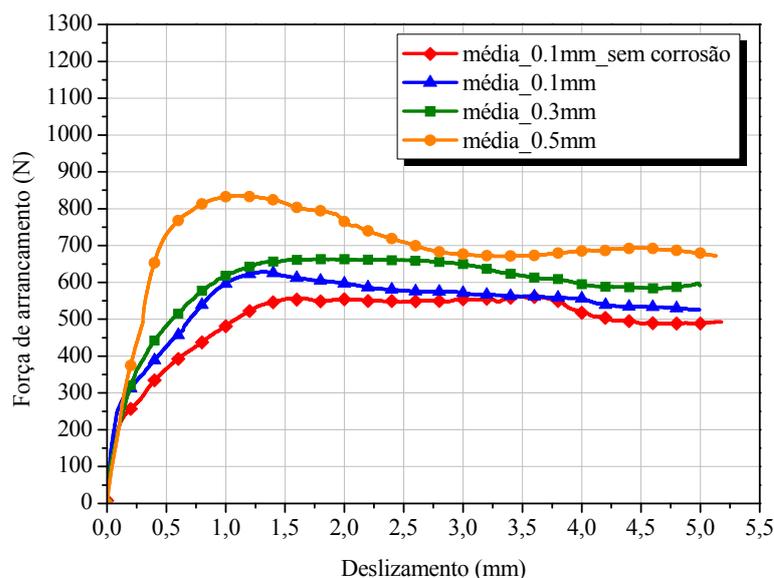


Figura 6.22 - Relação Força de arrancamento versus Deslizamento das fibras para as distintas aberturas de fissura

Na Figura 6.19 é possível observar, através do aspeto das fibras após os ensaios de arrancamento, que a corrosão induzida foi mais intensa quanto maior foi a abertura de fissura. Esta corrosão, conforme verificado, não se concentrou apenas na zona da fissura, tendo-se estendido a toda a superfície da fibra. Este facto permite concluir que nos provetes fissurados, os cloretos atingiram toda a superfície da fibra pela fissura e por absorção da solução, causando a despassivação das fibras de aço e conseqüente corrosão. No entanto, observa-se que nos provetes não fissurados (Figura 6.19d) as fibras não foram afetadas por fenómenos de corrosão, mantendo-se passivadas no interior da matriz.

Nas Figuras 6.21 e 6.22, referentes à relação força de arrancamento versus deslizamento das fibras da matriz, para as distintas aberturas de fissura, verifica-se um aumento da força de arrancamento com o aumento da abertura de fissura, que pode ser justificado pelo aumento da rugosidade que os produtos de corrosão causam nas fibras, provocando um aumento da resistência ao deslizamento da fibra em relação ao seu meio envolvente.

A Figura 6.21 também revela a ocorrência de uma dispersão muito elevada da força de arrancamento das fibras durante o processo de deslizamento da fibra. A forma da curva força de arranque versus deslizamento apresenta algumas diferenças em relação à obtida em ensaios de arranque direto de fibras (Cunha et al 2010) (Figura 2.4), dado ter apresentado na fase pós

pico uma resistência residual superior ao registado nos ensaios de arranque direto. Esta evidência poderá ser devida ao facto de as fibras terem ficado com uma ligeira inclinação, e não ortogonais como previsto, o que acrescenta no arrancamento das fibras um outro efeito de fricção, denominado “*snubbing effect*”, proveniente do atrito fibra/matriz, aquando do arrancamento de fibras inclinadas de uma matriz cimentícia (Figura 6.23). Este efeito é caracterizado por as fibras na zona em que atravessam as fissuras tenderem a se manter perpendiculares ao plano da fissura com o aumento da abertura de fenda. Com o aumento da força aplicada, a fibra tende a endireitar-se no sentido da força de arrancamento, causando um aumento da resistência residual do arrancamento da fibra (Døssland, 2008).



Figura 6.23 - Efeito de “*snubbing*” observado no arrancamento das fibras (Døssland, 2008).

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E INVESTIGAÇÃO FUTURA

7.1 Introdução

O trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação pretende ser uma contribuição para o estado do conhecimento relativo à durabilidade do betão auto-compactável reforçado com fibras de aço, nomeadamente, na avaliação da possibilidade de utilizar ensaios correntes de caracterização mecânica e de indicadores de durabilidade do betão convencional no BACRFA, na avaliação de técnicas eletroquímicas de monitorização da corrosão de fibras de aço e no estudo do comportamento ao arrancamento de fibras de aço face à ação da corrosão.

O programa experimental desenvolvido envolveu a caracterização das propriedades mais relevantes do desempenho do BAC, com e sem reforço de fibras de aço, nomeadamente, a trabalhabilidade, o comportamento mecânico e a durabilidade. Pretendeu-se com a determinação dos indicadores de durabilidade do BACRFA perceber qual a ordem de grandeza dos resultados e se os mesmos são comparáveis com o betão convencional.

No âmbito do estudo da ação da corrosão no comportamento mecânico do BACRFA fendilhado, foi realizada um programa experimental de caracterização da corrosão das fibras e de avaliação do comportamento ao arrancamento destas em betão fendilhado, sujeitas previamente à ação da corrosão por exposição a ambiente agressivo de cloretos.

No presente capítulo, apresentam-se as conclusões gerais, resultantes da análise dos resultados experimentais obtidos.

Encontram-se também neste capítulo, algumas sugestões para investigação futura, relativas a aspetos que não foram abordados ou aprofundados ao longo deste trabalho, e que poderão contribuir para o aumento do conhecimento da temática abordada.

7.2 Conclusões Gerais

Conforme referido anteriormente, foi realizado um programa experimental de avaliação da trabalhabilidade, do comportamento mecânico e da durabilidade do BAC e do BACRFA. Com a realização destes ensaios pretendeu-se avaliar a possibilidade de utilizar os ensaios correntes de caracterização do betão convencional na caracterização do BACRFA, devido à ausência de normalização aplicável a BRFA, nomeadamente na avaliação de indicadores de durabilidade.

Em relação à **trabalhabilidade**, a adição de fibras de aço ao BAC provoca uma redução da condição de auto-compactabilidade do betão, no entanto, esta não se revelou significativa. As dimensões do orifício do funil utilizado no ensaio de avaliação da fluidez da mistura deverão ser adequadas ao comprimento e teor de fibras usado no betão, de modo a este ensaio ser válido para a avaliação da trabalhabilidade do BACRFA, visto que as fibras podem tender a acumular-se neste orifício, impedindo que o betão flua. O ideal seria dispor de mecanismo que permitisse regular a dimensão do orifício de forma a que esta seja representativa dos obstáculos que o BACRFA encontrará na aplicação real em termos de fluidez e passagem. A adição de fibras de aço não afeta o teor de ar e a massa volúmica do betão auto-compactável no estado fresco.

No que concerne ao **comportamento mecânico**, verificou-se que a adição de fibras de aço ao BAC provocou um aumento pouco significativo do módulo de elasticidade, como seria expectável, dado a percentagem reduzida de fibras na composição. A evolução do módulo de elasticidade com a idade, nos betões em estudo, é mais pronunciada até aos 28 dias de idade, a partir da qual o aumento de E_{cm} é menos acentuado. Esta evolução do módulo de elasticidade poderá ser prevista de acordo com a proposta do Eurocódigo 2.

A resposta tensão-extensão de compressão evidenciou que as fibras permitem aumentos significativos na resistência pós pico, resultando um aumento apreciável na capacidade de absorção de energia de deformação axial por compressão. A evolução da resistência à compressão com a idade, nos betões em estudo, poderá ser prevista de acordo com a proposta do Eurocódigo 2.

Foi no entanto nos ensaios de flexão que mais se revelou o efeito benéfico da adição de fibras ao BAC. Para além do aumento da resistência à tração em flexão, os valores obtidos para os parâmetros de resistência residual e equivalente de tração em flexão foram muito elevados, face mesmo aos valores existentes na bibliografia da especialidade registados em BRFA, o que demonstra o esforço de otimização realizado no desenho da composição pela equipa encarregue desta tarefa ao abrigo do projeto LEGOUSE.

No que diz respeito aos **indicadores de durabilidade**, constatou-se que a adição de fibras de aço ao betão originou um muito ligeiro, e aparentemente, muito pouco significativo aumento da absorção de água por imersão (5.6% em relação ao BAC) e não afetou a absorção de água por capilaridade do betão.

Devido às propriedades de auto-compactibilidade dos betões, a adição de fibras não provocou uma alteração considerável da porosidade aberta e da porosidade capilar do BACRFA. Este facto também foi verificado na avaliação da permeabilidade ao ar e à água do BACRFA, uma vez que a adição de fibras não afetou estes dois parâmetros, cujos valores foram bastante reduzidos por se tratar de betões auto-compactáveis.

A presença das fibras diminuiu a resistividade elétrica do BACRFA (63% em relação ao BAC) devido à elevada condutividade das fibras, indiciando que este ensaio pode não ser apropriado para este tipo de betões, a não ser que seja efetuado um processo de calibração para os BRFA. O processo de calibração deverá ter em consideração a influência da condutividade das fibras no campo elétrico gerado no betão. Na análise da difusão de cloretos por migração em regime não estacionário, verifica-se que a base de comparação entre BAC e BACRFA poderá não ser tão imediata, uma vez que as fibras de aço poderão originar que os iões cloreto se fixem preferencialmente nas fibras, impedindo ou retardando a penetração dos mesmos na matriz do betão. No entanto, e apesar de se observar uma crescente corrosão das fibras no decorrer do ensaio de migração, os coeficientes de difusão foram semelhantes em ambos os betões. Em condições de extrema agressividade por migração de cloretos, a corrosão das fibras causa macro-fissuração do betão envolvente e consequente spalling, devido ao aumento do volume das fibras associado à formação de óxidos de ferro. Quando as fibras estão ligeiramente corroídas, a resistência à tração não foi afetada pela corrosão das fibras. No entanto, quando as fibras estão severamente corroídas, a secção efetiva das fibras

sofre uma elevada diminuição, causando a redução da resistência à tração do BACRFA e da capacidade de absorção de energia.

No caso da resistência à penetração de cloretos por imersão, verifica-se que esta é mais elevada no betão sem fibras, o que justifica o facto dos iões cloreto se fixarem nas fibras, retardando a penetração dos iões na matriz do BACRFA. A avaliação da penetração de cloretos por imersão é um método mais prudente do que por migração, visto que é mais representativo do ambiente real de exposição embora seja mais moroso. Por migração, os resultados dos ensaios são qualitativos (carga elétrica transferida nos provetes é definida pelos valores indicados na norma aplicável, que são associados a uma classe de penetração de cloretos, a qual não fornece o valor do coeficiente de difusão) e provocam um aumento da temperatura no betão. Devido à auto-compactibilidade dos betões, o BACRFA e o BAC apresentaram uma elevada e semelhante resistência à carbonatação.

Na avaliação de **técnicas eletroquímicas de monitorização da corrosão de fibras de aço**, o potencial em circuito aberto diminuiu com o aumento do tempo de imersão da fibra numa solução de 3.5% NaCl (de -540 a -700 mV), o que significa que a probabilidade de corrosão das fibras numa solução com cloretos foi superior a 90% ($E_{corr} < -276$ mV) (ASTM C 876, 1999). Os valores elevados da densidade de corrente de corrosão e os valores reduzidos da resistência à polarização, obtidos pela técnica de polarização potenciodinâmica e linear, indicaram que as fibras de aço têm um elevado risco de corrosão num ambiente com cloretos. A análise microscópica eletrónica de varrimento da corrosão das fibras permitiu verificar que a corrosão nas fibras foi generalizada e os principais produtos de corrosão são óxidos de ferro.

No que respeita ao **comportamento de arrancamento de fibras de aço face à ação da corrosão**, este trabalho apresentou um procedimento experimental inovador desenvolvido para este efeito, sendo possível executar ensaios de arrancamento de fibras de aço com provetes cilíndricos de BAC pseudo-fissurados e sujeitos à ação da corrosão. Através de técnicas eletroquímicas conclui-se que o potencial de corrosão das fibras de aço atravessando uma pseudo-fissura diminui com o aumento da abertura de fissura, o que aumenta a possibilidade da fibra sofrer corrosão. Quando o betão não está fendilhado verificou-se uma diminuição da tendência para a corrosão das fibras embebidas na matriz cimentícia. A corrosão das fibras que atravessam as fissuras é generalizada em toda a superfície da fibra e

foi tão mais intensa quanto maior a abertura de fissura. A força de arrancamento das fibras de aço em BAC fissurado, após 10 dias de imersão numa solução de 3.5% NaCl, aumentou com o aumento da abertura de fissura, o que pode ter sido devido ao aumento da rugosidade que os produtos de corrosão causam nas fibras, provocando um aumento da ligação interfacial fibra/matriz cimentícia. No arrancamento de fibras de aço por flexão do betão verificou-se uma força de arrancamento residual elevada no último patamar do arrancamento devido ao efeito de “*snubbing*” proveniente do atrito fibra/matriz.

7.3 Sugestões para trabalho futuro

No âmbito do trabalho desenvolvido nesta dissertação, existem alguns campos de investigação que poderão ser aprofundados em trabalhos futuros, nomeadamente:

- Avaliação dos indicadores de durabilidade em betões auto-compactáveis com outras percentagens de fibras de aço e com outros tipos de fibras. Em fibras sintéticas será especialmente importante avaliar a evolução da abertura de fissura em provetes fissurados sob distintas condições de temperatura e humidade, pois as propriedades destas fibras a longo termo poderão variar com estas condições;
- Estudo de outros indicadores de durabilidade no BACRFA, tais como a influência da ação de sulfatos, do gelo-degelo e da resistência ao fogo, neste último caso com os provetes sob estado de tensão representativo de condições de estado limite de utilização de edifícios e sistemas estruturais;
- Avaliação da evolução a longo prazo dos indicadores de durabilidade em betões auto-compactáveis reforçados com fibras de aço para exposição em ambiente natural.
- Estudo da resistência à penetração de cloretos e à carbonatação em provetes com apenas uma fibra, semelhantes aos apresentados na secção 6.1.2, para diferentes razões A/C e diferentes espessuras de recobrimento;
- Execução de técnicas eletroquímicas de polarização linear na monitorização da corrosão de fibras de aço embebidas no BAC;
- Avaliação do comportamento de arrancamento de fibras de aço em betão fissurado, sujeitas à ação da corrosão, conforme apresentado no presente trabalho, com as mesmas aberturas

de fissura, mas adotando diferentes estados de tensão e diferentes espessuras de recobrimento da fibra e condições de agressividade ambiental;

- Avaliação dos efeitos do aumento da corrosão das fibras de aço no comportamento mecânico do BACRFA, através do prolongamento do período de imersão apresentado no presente trabalho, com o intuito de avaliar se a corrosão severa das fibras pode provocar ou não o destacamento do betão envolvente;
- Avaliação do comportamento à flexão de vigas de BACRFA fissuradas, sujeitas à ação da corrosão;
- Desenvolvimento de um modelo analítico de avaliação da influência da ação da corrosão sobre o comportamento mecânico pós-fendilhação de estruturas de BACRFA;
- Integração da informação obtida, em modelos de previsão do comportamento a longo prazo de estruturas de BACRFA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI 544.5R-10 (2010) “*Report on the Physical Properties and Durability of Fiber Reinforced Concrete*”, ACI Committee 544;

ACI 544.1R-96 (2009) “*State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete*”, reported by American Concrete Institute, Committee 544, Farmington Hills, MI.;

Al-Shannag, M. (2007) “*Durability of Steel Fiber Reinforced Concrete in Sulfate Environment*”, Dissertação de Mestrado, King Saud University, College of Engineering, Research Center;

Alonso, C.; Andrade, C. (1990) “*Effect of nitride as a corrosion inhibitor in contaminated and chloride-free carbonated mortars*”, ACI Materials Journal. V. 78, n. 2, pp. 130-137;

Álvarez, A. (2009) “*Durabilidad del hormigón con fibras de acero*”, Minor thesis, Departamento de Engenharia de Construção, Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona, Espanha;

Balaguru, P., Shah, S. (1992) “*Fiber Reinforced Cement Composites*”, McGraw-Hill International Editions, pp. 530;

Balouch, S.; Forth, J.; Granju, J. (2010) “*Surface Corrosion of Steel fibre reinforced concrete*”, Cement and Concrete Research, vol 40, pp. 410–414;

Barros, J. (1996) “*Estado-da-arte dos betões reforçados com fibras*”, Engenharia Civil – UM, N.º 3, pp. 29-30;

Bentur, A., Mindess, S. (2007), “*Fibre Reinforced Cementitious Composites*”, 2nd edition, Francis & Taylor, UK;

BIBM, CEMBUREAU, EFCA, EFNARC, ERMCO (2005) “*The European Guidelines for Self-Compacting Concrete*”, Specification, production and use, Maio/2005;

Camões, A. (2002) “*Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes*”, Tese de doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães;

Camões, A., Costeira, A. (2012) “*Durabilidade de Betões Reforçados com Fibras de Aço*”, BE2012 – Encontro Nacional Betão Estrutural, 24-26 Outubro 2012, Porto;

Cascudo, O. (2005) “*Inspeção e diagnóstico de estruturas de concreto com problemas de corrosão da armadura*”, ISAÍÁ, G.C. (ed.), Concreto: Ensino, pesquisa e realizações, São Paulo, IBRACON;

CEB FIB Model Code (2010), V.1, pp. 350;

Corinaldesi, V.; Moriconi, G. (2004) “*Durable fiber reinforced self-compacting concrete*”, Cement and Concrete Research, V.34, pp. 249-254;

Costeira, A. (2011) “*Durabilidade de betão reforçado com fibras de aço*”, Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães;

Coutinho, M. (1998) “*Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem*”, Tese de doutoramento, FEUP, Porto, pp. 392;

Cunha, V., Barros, J., Sena Cruz, J. (2010) “*Pullout behaviour of steel fibres in self-compacting concrete*”, ASCE Materials in Civil Engineering Journal, 22(1), 1-9, <http://hdl.handle.net/1822/13290>;

Cunha, V., Barros, J., Sena Cruz, J. (2007) “*Pullout behaviour of hooked-end steel fibres in self-compacting concrete*”, Report 07-DEC/E06, pp. 90;

Døssland, Å (2008) “*Fibre Reinforcement in Load Carrying Concrete Structures*”, Tese de doutoramento, Departamento de Engenharia Estrutural, Faculdade de Engenharia, Ciência e Tecnologia, Universidade de Ciência e Tecnologia, Noruega;

Dupond, D. (2003) “*Modelling and experimental validation of the constitutive law and cracking behaviour of fiber reinforced concrete*”, Katholieke Universiteit Leuven, 2003;

EFNARC (2002) “*Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*”, EFNARC, Association House, UK;

Ferrara, L., Park, Y., Shah, S. (2007) “*A method for mix-design of fiber reinforced self-compacting concrete*”, Cement and Concrete Research, pp. 957-971, Elsevier Science Ltd.;

Ferreira, N. (2008) “*Influência das características das fibras no desempenho do betão*”, Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2007/2008, Departamento de Engenharia Civil, FEUP, Porto;

Ferreira, R. (2000) “*Avaliação de Ensaios de Durabilidade do Betão*”, Dissertação de Mestrado, Materiais e Reabilitação da Construção, Universidade do Minho, Guimarães;

Figueiredo, A. (2000) “*Concreto com Fibras de Aço*”, Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/260, São Paulo, pp. 12;

Gomes, F. (2010) “*Betão Auto-Compactável Reforçado com Fibras*”, Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010, Departamento de Engenharia Civil, FEUP, Porto;

González, J.; Miranda, J.; Feliu, S. (2004) “*Considerations on reproducibility of potential and corrosion rate measurements in reinforced concrete*”, Corrosion Science, V.46, pp. 2467-2485;

Graeff, A.; Pilakoutas, K.; Lynsdale, C.; Neocleous, K. (2009) “Corrosion Durability of Recycled Steel Fibre Reinforced Concrete”, Article No.7, Intersections/Intersec_ii, V.6, No.4;

Granju, J.-L.; Balouch, S. (2005) “*Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks*”, Cement and Concrete Research, vol 35, pp. 573–577;

Kaefer, L. (2004) “*Análise de Comportamento Eletroquímico de Revestimentos de Carbetos de Tungstênio Cimentados obtidos por Aspersão Térmica*”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná;

LNEC E390 (1993) “*Betões. Determinação da resistência à penetração de cloretos - Ensaio de imersão*”, LNEC, Lisboa, pp. 2;

LNEC E393 (1993) “*Betões. Determinação da absorção de água por capilaridade*”, LNEC, Lisboa, pp. 2;

LNEC E394 (1993) “*Betões. Determinação da absorção de água por imersão - Ensaio à pressão atmosférica*”, LNEC, Lisboa, pp. 2;

LNEC E395 (1993) “*Betões. Determinação da absorção de água por imersão - Ensaio no vácuo*”, LNEC, Lisboa, pp. 2;

LNEC E463 (2004) “*Determinação do coeficiente de difusão de cloretos por migração em regime não estacionário*”, LNEC, Lisboa, pp. 8;

LNEC E465 (2007) “*Betões. Metodologia para estimar as propriedades de desempenho do betão que permitem satisfazer a vida útil de projecto de estruturas de betão armado ou pré-esforçado sob as exposições ambientais XC e XS*”, LNEC, Lisboa, pp. 24;

Löfgren, I. (2005) “*Fibre Reinforced Concrete for Industrial Construction – a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis*”, Tese de doutoramento, Departamento de Engenharia Estrutural, Universidade de Tecnologia de Chalmers, Gotemburgo, Suécia, pp. 146;

Lourenço, L. (2012) “*Betão Reforçado com Fibras: aplicações e técnicas de inspeção e reforço de elementos estruturais afetados pela ação de um fogo*”, Tese de doutoramento Engenharia Civil/Ramo de Estruturas, Universidade do Minho, Guimarães;

Mangat, P. e Gurusamy, K. (1987) “Chloride Diffusion in Steel Fiber-Reinforced Marine Concrete”, Cement and Concrete Research, vol 17, pp. 385-396;

Miao, C., Mu, R., Tian, Q., Sun, W. (2002) “*Effect of sulfate solution on the frost resistance of concrete with and without steel fiber reinforcement*”, *Cement and Concrete Research*, v. 32, pp. 31–34;

Nordstrom, E. (2005) “*Durability of Sprayed Concrete – Steel fibre corrosion in cracks*”, Tese de doutoramento, Departamento de Engenharia Civil e de Ambiente, Divisão de Engenharia Estrutural, Universidade de Tecnologia de Luleå, Suécia;

NP EN 197-1 (2001) “*Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*”, IPQ;

NP EN 933-1 (2002) “*Ensaio das propriedades geométricas dos agregados – Parte 1: Análise Granulométrica. Método de peneiração*”, IPQ;

NP ENV 206-1 (2007) “*Betão: Comportamento, produção, colocação e critérios de conformidade*”, IPQ, pp. 21;

NP EN 12350-2 (2009) “*Ensaio de betão fresco, Parte 2: Ensaio de espalhamento*”, IPQ, Lisboa, pp. 11;

NP EN 12350-6 (2002) “*Ensaio do Betão fresco, Parte 6: Densidade*”, IPQ, Lisboa, pp. 13;

NP EN 12350-7 (2009) “*Ensaio do Betão fresco, Parte 7: Determinação do teor de ar, Métodos pressiométricos*”, IPQ, Lisboa, pp. 26;

NP EN 12350-8 (2010) “*Ensaio do Betão fresco, Parte 8: Auto-Compactável - Ensaio do diâmetro de espalhamento*”, IPQ, Lisboa;

NP EN 12350-9 (2010) “*Ensaio do Betão fresco, Parte 8: Auto-Compactável - Ensaio do Funil-V*”, IPQ, Lisboa;

NP EN 12350-10 (2010) “*Betão do betão fresco, Parte 10: Auto-Compactável - Ensaio da Caixa L*”, IPQ, Lisboa;

NP EN 12390-2 (2009) “*Ensaio do betão endurecido, Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica*”, IPQ, Lisboa, pp. 11;

NP EN 12390-3 (2011) “*Ensaio do betão endurecido, Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio*”, IPQ, Lisboa, pp. 21;

NP EN 12390-6 (2003) “*Ensaio do betão endurecido, Parte 6: Resistência à tracção por compressão de provetes*”, IPQ, Lisboa, pp. 14;

Pereira, E. (2006) “*Steel Fibre Reinforced Self-compacting Concrete: from material to mechanical behavior*”, Dissertação de aptidão pedagógica e capacidade científica, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, pp. 188;

Polder, R., Andrade, C. Elsener, B., Vennesland, O. (2000) “RILEM TC 154-ECM: Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete”, *Materials* 33: 603-611;

FprCEN/TS 12390-12 (2010) “*Testing hardened concrete – Part 12: Determination of the potential carbonation resistance of concrete: Accelerated carbonation method*”, Technical Specification, European Committee for standardization, Brussels;

Rahmani, T.; Kiani, B.; Sami, F.; Fard, B.; Farnam, Y. e Shekarchizadeh, M. (2011) “*Durability of glass; polypropylene and steel fiber reinforced concrete*”, XII DBMC - International conference on durability of building materials and components, Porto;

Rapoport, J.; Aldea, C.; Shah, S.; Ankenmam, B.; Karr, A. (2002), “*Permeability of Cracked Steel Fiber – Reinforced Concrete*”, *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, V. 14, No. 4, pp. 355 -358, American Society of Civil Engineers, Washington DC.;

Rider, R. e Heidersbach, R. (1980) “*Degradation of Metal Fiber-Reinforced Concrete Exposed to a Marine Environment*”, STP 713 Corrosion of Reinforcing Steel In Concrete (ASTM International);

RILEM TC 50-FMC (1985) “*Determination of fracture energy of mortar and concrete by means of threepoint bend tests on notched beams*”, *Materials and Structures*, 18(106), pp. 285-290;

RILEM TC 56-MHM (1988) “*CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth*”, *Materials and Structures*, V.21, pp. 453-455;

RILEM TC 154-EMC (2004) “*Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion*”, *Materials and Structures*, V.37, pp. 623-643;

RILEM TC 162-TDF (2003) “*Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. σ - ϵ -design method. Final Recommendation*”, *Materials and Structures*, V. 36, pp. 560-567;

Rostasy, F. e Sprenger, K. (1984) “*Strength and deformation of steel fibre reinforced concrete at very low temperature*”, *Int. J. Cement Composites and Lightweight Concrete*. 6, pp. 47-51;

Shi, X.; Xie, N.; Fortune, K.; Gong, J. (2012) “*Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview*”, *Construction and Building Materials*, V.30, pp.125-138;

Solgaard, A.; Kuter, A.; Edvardsen, C.; Stang, H.; Geiker, M. (2010) “*Durability Aspects of Steel Fibre Reinforced Concrete in Civil Infrastructure*”, Proc. 2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructure, 4th – 6th October 2010, Delft, The Netherlands;

Stanish, K., Hooton, R. e Thomas, M. (1997) “*Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete*”, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Ontario, Canada;

Tanesi, J., Graybeal, B., Simon, M. (2004) “*Effects of curing procedure on freeze-thaw durability of ultra-high performance concrete*”, (BEFIB’2004) - 6th International RILEM Symposium on fibre-reinforced concretes (FRC), Varenna;

Teruzzi, T., Cadoni, E., Frigeri, G., Cangiano, S., Plizzarli, G. (2004) “*Durability aspects of Steel Fibre Reinforced Concrete*”, (BEFIB’2004) – 6th Internacional RILEM Symposium on fibre-reinforced concretes (FRC), proceedings pro039;

Trottier, J. e Forgeron, D. (2001) “*Cumulative Effects of Flexural Fatigue Loading and Freezing and Thawing Cycles on the Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete*”, Third International Conference on Concrete Under Severe Conditions, Environment and Loading, Vancouver, BC, Canada, V. 1, pp. 1165-1176;

Tsai, C., Li, L., Chang, C., Hwang, C., (2009) “*Durability Design and Application of Steel Fiber Reinforced Concrete in Taiwan*”, Arabian Journal for Science and Engineering, V. 34, Number 1B;

Waweru, R. (2011) “*The effect of fiber corrosion on shear capacity of steel fiber reinforced concrete beams and an initial investigation on alkali-silica reaction in steel fiber reinforced concrete*”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, University of Texas at Arlington;

Wilson e Carter (1999) “*British Standard and RILEM water absorption tests: A critical evaluation*”, s.l., Materials and Structure;

Whiting, D. e Nagi (2003) “*Electrical Resistivity of Concrete*”, A Literature Review, R&D. 2457, Skokie, USA, Portland Cement Association;

Wolyniec, S. (2003) “*Técnicas Eletroquímicas em Corrosão*”, Edusp - Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil;

Woodrow, T. (1980) “*Marine Durability Survey of the Tongue Sands Tower*”, Concrete in the Oceans Technical Report No. 5, Taylor Woodrow Research Laboratories, Canada;

Yoon, I. (2012) “*Chloride Penetration through Cracks in High- Performance Concrete and Surface Treatment System for Crack Healing*”, Hindawi Publishing Corporation, Advances in Materials Science and Engineering, V. 2012, Article ID 294571, pp. 8;