

**RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM
DIFERENTES TIPOS DE BETÕES SUJEITOS A
ENSAIOS PROLONGADOS DE IMERSÃO**

Diogo José Scheepers Carrinho

Dissertação para a obtenção de Grau de Mestre em

ENGENHARIA CIVIL

Orientador: Prof. Doutor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas

Júri

Presidente: Prof. Doutor Albano Luís Rebelo da Silva das Neves e Sousa

Orientador: Prof. Doutor José Alexandre de Brito Aleixo Bogas

Vogal: Doutor António Carlos Bettencourt Simões Ribeiro

Outubro de 2018

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

Gostaria de demonstrar o meu profundo agradecimento ao meu orientador, Professor Doutor Alexandre Bogas, por todo o apoio prestado ao longo deste trabalho, desde a partilha de conhecimentos, sugestões, disponibilidade, e, acima de tudo, pela confiança que depositou em mim.

Aos meus colegas de trabalho, Jorge Pontes e Sofia Real, cuja ajuda, disponibilidade e apoio foram essenciais para que a realização desta dissertação fosse possível.

Agradeço também o auxílio e disponibilidade dos técnicos do Laboratório de Construção do Departamento de Eng. Civil e Arquitetura do Instituto Superior Técnico.

À minha família, um profundo e sincero obrigado por todo o apoio e dedicação que sempre prestaram ao longo de toda a minha vida académica e que permitiu a conclusão com sucesso desta difícil etapa.

Resumo

O presente estudo tem como principais objetivos a caracterização e avaliação da penetração de cloretos em betões produzidos com diferentes tipos de agregados e tipos de ligantes, bem como aferir a adequabilidade dos coeficientes de difusão de cloretos, determinados a partir de ensaios acelerados laboratoriais, na caracterização da durabilidade destes betões quando inseridos em ambiente submerso.

Para tal, foi desenvolvida uma vasta campanha experimental que envolveu a produção de diferentes tipos de betões e a sua caracterização em termos de resistência à penetração de cloretos, tendo por base ensaios acelerados de migração e ensaios de imersão em solução salina, de média duração. Na produção dos betões, foram utilizados três tipos de agregados de diferente massa volúmica (brita calcária, Leca e Stalite) e três tipos de adições (sílica fumo, cinzas volante e filler calcário), em variadas percentagens de substituição.

De uma forma geral, confirma-se que o fator condicionante na difusão e penetração de cloretos foi a qualidade da matriz cimentícia, (relação água/ligante). A incorporação de agregados leves não influenciou de forma significativa o coeficiente de difusão, mas nos betões com agregados leves mais porosos ocorreu um decréscimo na resistência ao ingresso de cloretos. O ensaio de imersão foi capaz de caracterizar a potencial contribuição das adições pozolânicas na resistência à penetração de cloretos, permitindo uma melhor simulação da realidade. Conclui-se que a utilização do ensaio RCMT, na caracterização da resistência à penetração de cloretos em ambiente submerso, deve ser realizada de forma separada, consoante o tipo de ligante e, eventualmente, de agregado.

Palavras-Chave:

Durabilidade do betão; resistência à penetração de cloretos; ensaio acelerado de migração de cloretos; ensaio de imersão

Abstract

This paper aims to characterize and evaluate the chloride penetration in concretes produced with different types of aggregates and binders, as well as to analyze the adequacy of using the chloride diffusion coefficient, determined from laboratory accelerated tests, to characterize the durability of these concretes when exposed in a saline submerged environment.

To do this, a vast experimental campaign was carried out, involving the production of different types of concrete and their characterization in terms of resistance to chloride penetration, based on accelerated migration tests and semi long-term immersion tests. Three types of aggregate of different density (limestone, Leca and Stalite) and three types of addition (silica fume, fly ash and limestone filler) at varying replacement percentages, were used in the concrete production.

In general, it is confirmed that the main factor ruling the diffusion and penetration of chlorides was the quality of the cement paste (water/binder ratio). The incorporation of LWA did not significantly influence the diffusion coefficient, but in the concretes with more porous LWA a decrease in the chloride penetration resistance occurred. The immersion test was able to characterize the potential contribution of the pozzolanic additions in the chloride penetration resistance, being the more appropriate test to simulate reality. It is also possible to conclude that the use of the RCMT test for the characterization of the resistance to chloride penetration into concrete must be done separately, depending on the type of binder and, eventually, the type of aggregate.

Keywords:

Concrete durability; Chloride-ion penetration resistance; Rapid chloride migration test; Immersion test

Acrónimos

BEAL - Betão estrutural de agregados leves

BAN - Betão de agregados naturais

SF – Sílica de fumo

CZ – Cinza volante

FC – Filler calcário

SP - Superplastificante

a/c - Relação água / cimento

a/l - Relação água / ligante

RCMT - Rapid chloride migration test

Abaix. - Abaixamento

Simbologia

kg – Quilograma

g - Grama

m - Metro

cm - Centímetro

mm - Milímetro

nm - nanómetro

µm - micrómetro

ppm – Partes por milhão

m² - Metro quadrado

m³ - Metro cúbico

l - Litro

h - Hora

min - Minuto

s - Segundo

C-S-H - Silicato de cálcio hidratado

pH - potencial de hidrogénio

°C - Grau Celsius

MPa - Mega Pascal

V - Volt

KN - Quilo Newton

ρ - Massa volúmica

ρ_{fresca} - Massa volúmica fresca

ρ_{seca} - Massa volúmica seca

$f_{c,i}$ - Resistência à compressão aos "i" dias

f_c / ρ_{seca} - Eficiência estrutural

CV - Coeficiente de variação

R^2 – Coeficiente de determinação

$D_{\text{Cl,RCMT}}$ - Coeficiente de difusão em regime não estacionário (ensaio RCMT)

$D_{\text{Cl,Im}}$ - Coeficiente de difusão no ensaio de imersão

C_s – Concentração superficial de cloretos

K_{cr} – Parâmetro de penetração

Índice

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Organização do trabalho	3
2. Estado da Arte	5
2.1. Introdução	5
2.2. Mecanismos de deterioração do betão armado.....	5
2.3. Propriedades de transporte no betão	6
2.4. Corrosão induzida por ataque de cloretos	8
2.5. Ingresso de cloretos no betão	10
2.5.1. Teor crítico de cloretos	11
2.5.2. Capacidade de fixação de cloretos.....	12
2.5.3. Coeficiente de difusão, D_{Cl}	13
2.5.4. Concentração superficial de cloretos, C_s	14
2.5.5. Leis de difusão	15
2.5.6. Ensaio de determinação da resistência à penetração de cloretos no betão	16
2.5.7. Betão estrutural de agregados leves	18
2.5.8. Influência de adições no betão	21
3. Materiais e metodologia de ensaio	25
3.1. Introdução	25
3.2. Planeamento do trabalho experimental.....	25
3.3. Materiais utilizados	26
3.3.1. Cimento	26
3.3.2. Adições	26
3.3.3. Adjuvantes.....	27
3.3.4. Agregados.....	28
3.4. Composição dos betões	32
3.5. Produção do betão	34
3.6. Moldagem, compactação e cura do betão	35
3.7. Ensaio de caracterização dos betões no estado fresco.....	36
3.7.1. Ensaio de abaixamento do cone de Abrams.....	36
3.7.2. Massa volúmica do betão no estado fresco	36

3.8. Ensaios de caracterização dos betões no estado endurecido.....	37
3.8.1. Resistência à compressão	37
3.8.2. Massa volúmica no estado endurecido	37
3.8.3. Ensaio acelerado de migração de cloretos em regime não estacionário	37
3.8.4. Ensaio de imersão em solução salina.....	38
4. Análise e discussão de resultados.....	41
4.1. Caracterização do betão no estado fresco	41
4.2. Massa volúmica no estado endurecido	43
4.3. Resistência à compressão	43
4.4. Ensaio acelerado de migração de cloretos, RCMT	46
4.4.1. Influência do tipo de agregado	48
4.4.2. Influência do tipo de ligante	51
4.5. Ensaio de imersão	56
4.5.1. Perfis de cloretos	58
4.5.1.1. Influência da relação a/l	59
4.5.1.2. Influência do tipo de agregado.....	59
4.5.1.3. Influência do tipo de ligante.....	60
4.5.2. Coeficiente de difusão de cloretos nos ensaios de imersão, $D_{Cl,Im}$	63
4.5.2.1. Influência da relação a/l	64
4.5.2.2. Influência do tipo de agregado.....	65
4.5.2.3. Influência do tipo de ligante.....	66
4.5.3. Concentração superficial de cloretos, C_s	70
4.6. Correlação entre ensaios	72
5. Conclusões	77
5.1. Conclusões gerais.....	77
5.2. Propostas de desenvolvimento futuro	80
Bibliografia	81
Anexos	A

Índice de figuras

Figura 3.2 - Agregado leve de argila expandida a) aspeto das partículas; b) partícula de leca com estrutura interna porosa envolta por camada compacta de algumas dezenas de micrómetros	29
Figura 3.3 - Agregado leve de ardósia expandida a) aspeto das partículas; b) partícula de Stalite obtida por um processo de trituração	29
Figura 3.7 - a) molde metálico; b) ensaio acelerado de migração de cloretos; c) método colorimétrico;.....	38
Figura 3.8 - a) Tanque de ensaio de imersão b) Método potenciométrico.....	39
Figura 4.1 - Coeficientes de difusão de todas as misturas ensaiadas, organizadas por relação a/l.....	48
Figura 4.2 - Evolução dos coeficientes de difusão em betões produzidos com agregados naturais, para diferentes relações a/l.....	48
Figura 4.3 – Coeficientes de difusão em betões de CEM I, para diferentes tipos de agregado	49
Figura 4.4 - Evolução do coeficiente de difusão com a relação a/l em betões de CEM I, com diferentes tipos de agregado	50
Figura 4.5 - Relação exponencial entre resultados obtidos e a relação a/c e respetiva comparação com outros autores (betões com cimentos tipo I).....	51
Figura 4.6 - Evolução do coeficiente de difusão para misturas com cinza volante, para diferentes relações a/l.....	52
Figura 4.7 - Evolução do coeficiente de difusão para misturas com cinzas volante para diferentes % de substituição	52
Figura 4.8 - Evolução do coeficiente de difusão para misturas com sílica de fumo, para diferentes relações a/l.....	52
Figura 4.9 - Evolução do coeficiente de difusão para misturas com sílica de fumo, para diferentes relações a/l.....	52
Figura 4.10 - Evolução do coeficiente de difusão para misturas com filler calcário, para diferentes relações a/l.....	53
Figura 4.11 - Evolução do coeficiente de difusão para misturas com filler calcário para diferentes % de substituição	53
Figura 4.12 – Evolução do coeficiente de difusão em função de a/c, para diversos tipos de ligante.....	55
Figura 4.14 - Representação gráfica dos resultados obtidos para a concentração superficial de cloretos.....	57
Figura 4.15 - Representação gráfica dos resultados obtidos para o parâmetro de penetração	57
Figura 4.16 – Relação entre o parâmetro de penetração, com a relação a/l, para cada tipo de agregado	60
Figura 4.17 – Evolução do parâmetro de penetração em função da relação a/c, para diversos tipos de ligante	63

Figura 4.18 - Evolução do coeficiente de difusão em função da relação a/l, para betões com diversos tipos de ligante e agregado	64
Figura 4.19 - Evolução dos coeficientes de difusão com a relação a/l	65
Figura 4.20 - Evolução dos coeficientes de difusão com a relação a/l, para diferentes tipos de agregado	66
Figura 4.21 – Evolução do coeficiente de difusão com a % substituição de cinzas volante.....	67
Figura 4.22 - Evolução do coeficiente de difusão com a % substituição de sílica de fumo	67
Figura 4.23 - Evolução do coeficiente de difusão com a % substituição de filler calcário	68
Figura 4.24 - Evolução da concentração superficial de cloretos em função da relação a/l, para betões com diferentes tipos de ligante e agregado	71
Figura 4.25 - Relação entre o coeficiente de difusão obtido no ensaio acelerado RCMT, $D_{cl,28d,RCMT}$ e o coeficiente de difusão determinado nos ensaios de imersão, $D_{cl,90d,im}$ (consideração de todos os betões estudados)	74
Figura 4.26 –Relação entre o coeficiente de difusão obtido no ensaio acelerado RCMT, $D_{cl,28d,RCMT}$ e o coeficiente de difusão determinado nos ensaios de imersão, $D_{cl,90d,im}$ (não considerando betões com cinzas volante)	75
Figura 4.27 - Relação entre o coeficiente de difusão obtido no ensaio acelerado RCMT, $D_{cl,28d,RCMT}$ e o coeficiente de difusão determinado nos ensaios de imersão, $D_{cl,90d,im}$ (BAN com CEM I, CEM II/A-D e CEM II/A-L; BEAL com Stalite).....	75
Figura 4.28 - Relação entre o coeficiente de difusão obtido no ensaio acelerado RCMT, $D_{Cl,RCMT}$ e o parâmetro K_{cr} determinado nos ensaios de imersão (BAN com CEM I, CEM II/A-D e CEM II/A-L; BEAL com Stalite).....	76
Figura 4.29 - Relação entre o coeficiente de difusão, $D_{Cl,90,im}$ e o parâmetro K_{cr} , ambos determinados nos ensaios de imersão (BAN com CEM I, CEM II/A-D, CEM II-AV, CEM II-BV e CEM II/A-L; BEAL com Stalite e com Leca).	76

Índice de quadros

Quadro 3.1 - Ensaio aos agregados e betões	25
Quadro 3.2 - Características físicas do cimento	26
Quadro 3.3 - Características físicas das adições	27
Quadro 3.4 - Granulometria dos agregados	30
Quadro 3.5 - Características físicas dos agregados.....	31
Quadro 3.6 - Tipos de mistura ligante consideradas	33
Quadro 3.7 - Composição dos betões com agregados de massa volúmica normal	33
Quadro 3.8 - Composição dos betões com agregados leves.....	34
Quadro 3.9 – Ensaio realizados e dimensões dos provetes produzidos.....	35
Quadro 4.1 - Resultados do ensaio de resistência à compressão a 28 e 90 dias	44
Quadro 4.3 - Resultados do ensaio de imersão	56

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Atualmente, o betão armado é o material de construção mais utilizado à escala global. A sua utilização intensiva em estruturas de edifícios e pontes teve início na segunda metade do século XX, devido à sua resistência, adaptabilidade e versatilidade. No entanto, ao contrário do inicialmente previsto, o betão apresenta durabilidade limitada, o que motivou um esforço de investigação crescente na compreensão dos mecanismos de degradação e no estabelecimento de metodologias para a caracterização da durabilidade e previsão de vida útil das estruturas de betão. De entre os vários mecanismos de degradação, a corrosão de armaduras induzida por ataque de cloretos é considerada uma das principais causas de degradação do betão armado e da consequente limitação da sua vida útil. O ataque das armaduras por parte deste tipo de ião propicia o aumento da taxa de corrosão das mesmas, conduzindo a importantes perdas de resistência dos elementos estruturais. Este problema assume particular importância a nível nacional, em que várias estruturas localizadas na região costeira são condicionadas por este fenómeno de degradação.

A durabilidade do betão avalia-se pelo desempenho das estruturas ou a partir de ensaios laboratoriais que simulam a degradação do betão. Estes últimos visam facilitar a avaliação e classificação expedita da durabilidade do betão e estão na base dos modelos atualmente propostos na normalização para previsão de vida útil a considerar no dimensionamento de estruturas. No caso particular da resistência ao ataque de cloretos, os betões têm sido analisados com base em ensaios laboratoriais que simulam o desenvolvimento das respetivas ações ou ainda indiretamente a partir de ensaios que visam caracterizar a microestrutura do betão (Bogas, Brito e Cabaço 2014; Bogas, Gomes e Real 2014). Vários métodos têm sido desenvolvidos, podendo ser classificados consoante a força motriz responsável pelo transporte de cloretos no betão (difusão ou migração) e consoante a variação da concentração de cloretos no betão ao longo do ensaio (regime estacionário ou regime não estacionário).

Nos últimos anos, o ensaio de migração de cloretos, desenvolvido por Luping (LNEC E463 2004), tem sido adotado em vários trabalhos de caracterização do betão para avaliar a sua resistência à penetração de cloretos (Mehta e Monteiro 2006, Safedian e Ramezani pour 2013, E463 2004). Os documentos normativos fib34 (2006) e a especificação LNEC E465 (2005) adotam este ensaio na metodologia que sugerem para a previsão de vida útil dos betões em ambiente real. De acordo com o documento Chlortest (2005), o ensaio de Luping é o ensaio acelerado laboratorial que melhor qualifica a durabilidade dos betões ao ataque de cloretos.

No entanto, os ensaios laboratoriais, em geral acelerados, apresentam limitações na avaliação do desempenho da durabilidade do betão inserido em estruturas reais, visto que não conseguem abranger os vários fenómenos que regem a sua degradação. Em particular, o ensaio acelerado de migração de cloretos baseia-se apenas na determinação expedita de um coeficiente de

difusão, que não é o único parâmetro responsável pela penetração de cloretos no betão. Desse modo, é importante aferir a adequabilidade dos ensaios laboratoriais na caracterização da durabilidade do betão e inferir a sua relação com o desempenho real dos mesmos, em condições de exposição não aceleradas, nomeadamente tendo em consideração distintos ambientes de exposição e diferentes composições e tipos de ligantes.

1.2. Objetivos

O presente estudo, realizado no âmbito de um trabalho de doutoramento em curso no departamento de engenharia civil do instituto superior técnico, tem como principais objetivos a caracterização e avaliação da penetração de cloretos em betões produzidos com diferentes tipos de agregados e tipos e quantidades de adições, bem como aferir a adequabilidade dos coeficientes de difusão de cloretos, determinados a partir de ensaios acelerados laboratoriais, na caracterização da durabilidade destes betões quando inseridos em ambiente submerso, correspondente à classe de exposição XS2, de acordo com a NP EN 206-1 (2007).

Para tal, e de modo a cumprir os respetivos objetivos, foi desenvolvida uma vasta campanha experimental que envolveu a produção de diferentes tipos de betões e a sua caracterização em termos de resistência à penetração de cloretos, tendo por base ensaios acelerados de migração e ensaios de imersão em solução salina, de média duração. Neste caso, o ensaio de imersão pretende simular, de forma laboratorial, condições equivalentes a ambientes de exposição de classe XS2.

Os betões foram produzidos com 3 tipos de agregados de porosidade muito distinta; um de massa volúmica normal (brita calcária), um agregado leve de argila expandida de origem nacional (Leca) e um agregado leve de ardósia expandida proveniente dos EUA (Stalite). Para além do tipo de agregado, procurou produzir-se misturas com diferentes relações água/ligante (0,35, 0,45 e 0,55), dosagens de cimento (350, 400 e 450 kg/m³) e distintas quantidades e tipos de adições, nomeadamente; cinzas volantes (CV), sílica de fumo (SF) e filler calcário (FL). Foi possível considerar alguns dos tipos de cimentos previstos na NP EN 197-1 (2012) mais utilizados a nível Nacional: Cimento tipo CEM I 42,5R; CEM II/A-D (com 6% SF); CEM II/A-V (15% CZ); CEM II/B-V (30% CZ); CEM II/A-L (15% FL); CEM II/B-L (30% FL). A consideração de vários betões com diferentes tipos de agregado, de ligante e relação a/l permite uma maior abrangência e validação do estudo realizado.

Assim, numa primeira fase do trabalho procedeu-se à seleção e caracterização dos materiais, definição das composições, produção dos provetes de ensaio e caracterização dos betões no estado fresco. Numa segunda fase do trabalho, procedeu-se à caracterização física, mecânica e de durabilidade dos betões, tendo por base a realização de ensaios laboratoriais de migração e de imersão em solução salina.

1.3. Organização do trabalho

A forma como a estrutura do trabalho se encontra organizada foi definida de modo a que a abordagem e desenvolvimento dos objetivos propostos seja realizada de forma sequencial. O trabalho divide-se em cinco capítulos e um anexo.

De uma forma geral, no 2º capítulo é realizada uma revisão bibliográfica das implicações que a penetração de cloretos tem na durabilidade do betão. Inicialmente, faz-se uma breve referência geral dos mecanismos de deterioração do betão armado e propriedades de transporte no mesmo. O capítulo prossegue com foco na penetração de cloretos no betão e o processo de corrosão das armaduras induzido por estes. Por último, é feita uma abordagem à forma como o ingresso de cloretos ocorre no betão, com especial destaque para os parâmetros que o permitem caracterizar, para os ensaios de determinação da resistência à penetração de cloretos e para a influência das adições no betão.

No 3º capítulo procura-se descrever a campanha experimental efetuada. É dado especial ênfase ao planeamento do trabalho experimental, materiais utilizados, produção e composições dos betões utilizados e aos ensaios de caracterização dos betões no estado fresco e endurecido.

No 4º capítulo é feita a apresentação, análise e discussão dos resultados obtidos em todos os ensaios realizados na campanha experimental.

Por fim, no 5º capítulo compilam-se as principais conclusões retiradas da análise dos resultados obtidos na campanha experimental.

2. Estado da Arte

2.1. Introdução

A importância de se garantir o adequado desempenho das estruturas durante o seu período de vida útil faz com que a durabilidade do betão seja alvo de forte esforço de investigação a nível internacional (Bogas 2011).

A durabilidade do betão é condicionada por variadas ações de natureza física, química, biológica ou mecânica. Entre estas, de acordo com Mehta e Monteiro (2006), a corrosão das armaduras é considerada a principal causa de deterioração do betão armado. No presente trabalho será abordada apenas a corrosão induzida por ataque de cloretos, que se constitui como um dos mecanismos de deterioração do betão mais comuns a nível nacional. De facto, sendo Portugal um país com elevada construção na zona costeira, a corrosão de armaduras devido ao ataque de cloretos assume um papel importante na durabilidade das estruturas de betão no nosso país (Bogas 2011).

Ao longo deste capítulo será apresentado um breve resumo dos aspetos principais da durabilidade do betão, com especial foco no que se refere ao ataque de cloretos. Será também discutida a durabilidade no caso particular dos betões leves, que serão alvo de estudo no presente trabalho.

2.2. Mecanismos de deterioração do betão armado

Para que uma estrutura de betão seja considerada durável, tem de ser capaz de desempenhar adequadamente as funções para a qual foi projetada, durante o tempo de serviço proposto e sob as condições ambientais em que se insere (Mehta e Monteiro 2006). Assim, a durabilidade do betão é influenciada maioritariamente por duas variáveis: as propriedades dos seus constituintes e o ambiente em que está inserido. É por esta razão que a norma NP EN 206-1 (2007) impõe limites em variados parâmetros das propriedades do betão, como a espessura de recobrimento, a dosagem de cimento ou a relação a/c , consoante o tipo de ambiente a que está exposto. Um tipo de betão pode ser considerado durável sob um tipo de condições ambientais e não durável sob outras condições. Como resultado das constantes interações entre o meio envolvente e a microestrutura do betão, as propriedades deste alteram-se ao longo do tempo. Assume-se que um material atinge o fim de ciclo de vida, assim que as suas propriedades se deterioreem a um ponto em que o material se considere inadequado para o fim que se destina ou se torne insustentável a nível económico (Mehta e Monteiro 2006).

O processo de deterioração do betão influencia diretamente a sua durabilidade (Bertolini, et al. 2004). Este processo pode ter diversas origens: físicas (variações de temperatura e humidade, ação gelo-degelo, deposições atmosféricas e cristalização de sais, elevadas temperaturas, fogo, sais descongelantes, retração plástica), mecânicas (abrasão, impacto, explosão, erosão ou

cavitação), químicas (eflorescências e lixiviação, ataque de sulfatos, íons magnésio e amônio, hidrólise da pasta de cimento por ação de águas puras ou moles, reações álcalis-agregado, ataque de ácidos, corrosão de armaduras por ação de cloretos ou dióxido de carbono), biológicas (bactérias, algas e fungos) e estruturais (carga excessiva, assentamento, carga cíclica, vibrações) (Bertolini, et al. 2004). Grande parte das ações de deterioração são resultado da circulação de fluidos ou gases no interior do betão. Como tal, no ponto seguinte são abordadas as diferentes propriedades de transporte no betão.

2.3. Propriedades de transporte no betão

No que respeita à durabilidade do betão, existem três fluidos com relevância para a sua deterioração: água (pura ou com íons dissolvidos), dióxido de carbono e oxigénio (Neville 1995). Sendo o betão um material compósito, formado essencialmente por água, ligante, agregados e adições, é natural que este apresente uma estrutura porosa, que permite uma constante interação com o ambiente envolvente. Segundo Neville (1995), a facilidade com que os fluidos conseguem penetrar e circular na estrutura porosa do betão afeta diretamente a sua durabilidade.

O movimento de fluidos e íons no interior do betão pode ocorrer de diversas formas: a difusão consiste no transporte de gases, íons ou vapor de água devido a gradientes de concentração; a absorção capilar corresponde à entrada de fluidos na rede porosa do betão devido a forças capilares que resultam da diferença de pressão entre a superfície da água no exterior do betão e a sua superfície nos poros capilares; a permeação diz respeito ao caudal escoado através do sistema poroso, em condições de saturação, devido a um gradiente de pressão; a migração consiste no movimento de íons devido à presença de um diferencial de potencial elétrico (Bertolini et al. 2004, Kropp 1995, Thomas 2016).

Qualquer um dos mecanismos de transporte ocorre no sistema de poros do betão. A microestrutura do betão, e conseqüentemente a sua estrutura porosa, é influenciada essencialmente pelo teor de pasta, presença de adições, granulometria das partículas e a dimensão e tipo de agregado (Garboczi 1995).

A porosidade do betão encontra-se presente em qualquer uma das três fases do betão: matriz cimentícia, agregados e interface agregado-pasta (Bogas 2011). A matriz cimentícia, formada pelos produtos das reações de hidratação do cimento, contém diversos poros interconectados cujos tamanhos variam desde a escala do nm até alguns mm. Assim, os poros presentes na matriz cimentícia dividem-se em três tipos, consoante a sua ordem de grandeza: poros intersticiais presentes nos C-S-H (também conhecidos como poros de gel), poros capilares e macroporos (Bertolini et al. 2004, Mehta e Monteiro 2006, Garboczi 1995). Os poros capilares resultam dos vazios formados pelos espaços não ocupados pelos produtos de hidratação e, contrariamente aos poros intersticiais, assumem especial relevância no transporte de substâncias no betão (Bertolini et al. 2004, Mehta e Monteiro 2006). Por último, existem igualmente os vazios de ar, que resultam do aprisionamento de bolhas de ar no interior do betão

aquando da betonagem. Enquanto que os poros capilares apresentam tipicamente formas irregulares, os vazios de ar possuem maioritariamente forma esférica (Bertollini et al. 2004, Mehta e Monteiro 2006).

A água é um elemento fundamental em todo o período de vida das estruturas de betão. É essencial para a sua formação, permitindo as reações de hidratação com o cimento, mas também é responsável por muitos dos processos de degradação do betão. No interior da matriz cimentícia a água pode estar presente sob diversas formas, sendo caracterizada consoante a facilidade com que pode ser removida: água capilar, água adsorvida, água zeolítica (ou interlaminar) e água de constituição (Mehta e Monteiro 2006).

É importante referir que uma matriz cimentícia porosa não é sinonimo de uma matriz cimentícia permeável, sendo que o contrário também se aplica. Para aferir a resistência à degradação do betão não basta ter em conta a porosidade total. O tamanho e a interconectividade dos poros assumem maior relevância (Bertollini et al. 2004). Segundo Neville (1995), para que uma estrutura porosa seja permeável, os poros têm de ser contínuos, formando assim uma rede conectada tridimensionalmente. Neste caso, refere que apenas os poros que possuem diâmetro superior a cerca de 120-160nm assumem um papel relevante no processo de transporte de fluidos no interior da pasta de cimento hidratada. Ainda de acordo com o autor, para além da descontinuidade dos poros, existem outros fatores que afetam a permeabilidade do betão: uma entrada estreita no poro (independentemente do seu diâmetro) e a presença de água adsorvida nos canais.

Powers, et al. (1954) afirma igualmente que a permeabilidade do betão é afetada pelo tamanho, distribuição e continuidade dos poros da matriz cimentícia. Segundo Bertollini et al. (2004), um decréscimo na percentagem de porosidade capilar implica um aumento da resistência mecânica da pasta de cimento e uma diminuição da sua permeabilidade. Com a diminuição da porosidade capilar, a conectividade do sistema poroso é afetada, chegando a um ponto em que deixa de haver conexão e o transporte de substâncias é feito forçosamente apenas pelos pequenos poros intersticiais.

Vários autores procuraram estabelecer um valor para a percentagem de porosidade capilar a partir da qual os poros deixam de estar conectados. Segundo Mehta e Monteiro (2006), uma redução da porosidade capilar de 40% para 30%, provoca um decréscimo elevado no coeficiente de permeabilidade (cerca de 110×10^{-12} cm/s para 20×10^{-12} cm/s). Porém, uma redução adicional para 20% já não provoca uma variação significativa no coeficiente de permeabilidade. Isto justifica-se pelo facto de para uma porosidade capilar de 30% a conectividade dos poros ser de tal forma tortuosa, que um decréscimo adicional neste parâmetro não terá grande impacto no coeficiente de permeabilidade.

A relação água/cimento desempenha um papel importante na porosidade capilar. A porosidade capilar diminui com a diminuição da relação a/c e com o aumento do grau de hidratação (Mehta e Monteiro 2006, Bertollini et al. 2004, Garboczi 1995, Powers et al. 1954). O grau de hidratação interfere na porosidade capilar uma vez que à medida que esta progride, ocorre uma redução

gradual dos poros de maior dimensão, que são preenchidos ou intercetados por novos produtos de hidratação (Bertolini et al. 2004).

Segundo Neville (1995), para valores de relação a/c superiores a 0,38, o volume preenchido por C-S-H é insuficiente para impedir o desenvolvimento de poros capilares, mesmo depois de concluída a hidratação da pasta.

De acordo com Mehta e Monteiro (2006), num betão compactado no estado fresco, existe a tendência de se formar pequenas bolsas de água em volta dos agregados de maior dimensão. Este fenómeno provoca um aumento local da relação a/c junto ao agregado, conduzindo a uma maior porosidade e menor resistência mecânica destas regiões.

Garboczi (1995) afirma que se as zonas de interface não se comunicarem, perdem importância nas propriedades de transporte do betão, uma vez que estas passam a ser reguladas pela matriz cimentícia. Segundo o autor, isto é atingido para volumes de agregados grossos inferiores a 50%. No entanto, um betão apresenta tipicamente percentagens de agregado superiores a este valor. Assim, na maioria dos betões deverá existir percolação na zona de transição agregado-pasta.

2.4. Corrosão induzida por ataque de cloretos

A corrosão ou oxidação das armaduras de uma estrutura em betão armado é considerada como um dos principais fatores responsáveis pela sua degradação (Neville 1995). A corrosão das armaduras, que pode ocorrer sob diversas formas e ter múltiplas origens, pode reduzir significativamente a resistência mecânica da estrutura, assim como reduzir o seu tempo de vida útil.

O betão é um material altamente alcalino, onde o pH pode atingir valores superiores a 13. Esta natureza alcalina é resultado das grandes concentrações de iões hidróxido (OH^-) que resultam das reações de hidratação do betão (Tuuti 1982, Mehta e Monteiro 2006). Devido a este ambiente alcalino, as armaduras ao serem colocadas em contacto com o betão formam uma película protetora por reação com os iões hidróxido, que impede o desenvolvimento de velocidades de corrosão significativas (Neville 1995, Bertollini et al. 2004, Poulsen e Mejlbro 2006). Esta película é formada por uma camada de óxido ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), compacta e contínua que adere fortemente à superfície da armadura e que permite reduzir a velocidade de corrosão da armadura para valores desprezáveis. Este processo é usualmente conhecido como passivação do aço (Bertollini et al. 2004).

Apesar da película passiva oferecer uma boa proteção às armaduras, esta pode ser destruída sob certas condições. No caso de o pH reduzir para valores na ordem dos 11, ou o valor do teor de cloretos junto das armaduras atingir um certo limite, ocorre a despassivação das armaduras e o processo de corrosão pode ser iniciado (caso estejam reunidas as condições necessárias) (Mehta e Monteiro 2006).

A corrosão é um processo eletroquímico que se desenvolve devido a uma diferença de potencial ao longo da armadura e envolve a transferência de elétrons entre um ânodo e um cátodo, através de um eletrólito (Neville 1995). Todo este processo inicia-se no ânodo, onde os íons Cl^- se combinam com íons Fe^{2+} , para formar FeCl_2 . Os íons Fe^{2+} resultam da oxidação do ferro da armadura (reação anódica). Desta oxidação resultam igualmente dois elétrons livres que se deslocam através da armadura até ao cátodo, onde são absorvidos pelos componentes do eletrólito e se combinam com a água e o oxigénio de maneira a formar íons hidróxido, OH^- (reação catódica). É de notar que os íons Fe^{2+} acidificam a região anódica, enquanto que os íons OH^- provocam um incremento do pH na zona catódica. Atraídos pela carga positiva da região anódica, os íons hidróxido deslocam-se através do eletrólito até à zona do ânodo, combinando-se com os íons Fe^{2+} para formar hidróxidos de ferro. Após oxidação adicional, transformam-se em ferrugem (Neville 1995). De notar igualmente que os elementos FeCl_2 podem sofrer hidrólise, formando igualmente hidróxidos de ferro ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) e libertando íons cloreto e hidrogénio. Assim, na região picada, os cloretos têm a capacidade de se autorregenerar, uma vez que não chegam a ser consumidos e propiciam a dissolução acelerada do aço nesta zona (Bertollini et al. 2004). Deste modo, assim que o processo de corrosão se inicia, tem condições para progredir indefinidamente (Bogas 2011).

A corrosão induzida por ataque de cloretos (também conhecida como “corrosão por picadas”) é caracterizada por apresentar regiões anódicas muito pequenas, face à região catódica. Isto acontece, uma vez que a película passiva que protege as armaduras apenas é destruída nas zonas onde o teor de cloretos ultrapassa o valor crítico (Bertollini et al 2004, Mehta e Monteiro 2006, Neville 1995, Kropp, 1995, Poulsen e Meljbro 2006, Abbas et al. 2018, Shi et al. 2011). De facto, a penetração de cloretos no betão não é feita de forma uniforme e a concentração deste tipo de ião junto das armaduras varia ao longo das mesmas (Muthulingam e Rao 2015).

A formação acumulada de produtos de corrosão na zona anódica é um fator que leva à degradação precoce da estrutura de betão armado. Consoante as condições de humidade e disponibilidade de oxigénio, os produtos de corrosão apresentam volumes que variam entre 2 e 6 vezes o seu volume inicial (Mehta e Monteiro 2006, Bertollini et al. 2004). Este acréscimo de volume provoca uma pressão radial em volta das zonas anódicas. Visto que o betão é um material com resistência à tração relativamente baixa, estas tensões introduzidas pelos produtos de corrosão podem provocar a sua fendilhação ou eventual delaminação do betão de recobrimento (Poulsen e Meljbro 2006).

Um dos principais mecanismos de degradação associado à corrosão induzida por cloretos é a redução da secção transversal da armadura (Neville 1995). A redução da secção transversal da armadura provoca consequências graves na resistência à tração das mesmas, podendo afetar igualmente a sua ductilidade. Outro mecanismo de degradação que pode ocorrer é a perda de aderência entre o aço e o betão (Bertollini et al. 2004, Mehta e Monteiro 2006, Poulsen e Meljbro 2006, Torres-Luque et al. 2014).

A despassivação das armaduras não é condição suficiente para que a corrosão se inicie. A corrosão das armaduras apenas tem início se estiverem reunidas determinadas condições. A primeira é a presença de água, que para além de fazer parte das reações catódicas, também funciona como eletrólito no betão. A segunda é a presença de oxigénio, determinante para que se gerem iões OH^- no cátodo e para definir o tipo e volume de produtos de corrosão que se formam no ânodo. Por último, para que o transporte de iões se possa estabelecer entre o cátodo e o ânodo, através do eletrólito, a resistividade do betão tem de ser suficientemente baixa (Bertollini et al. 2004).

De acordo com Bertollini et al. (2004), os valores de corrosão induzida por cloretos são mais elevados para teores de água no betão a rondar os 90 a 95% HR, enquanto que Neville (1995) afirma que o valor ótimo ronda os 70 a 80%. Isto sucede, visto que o teor de água no betão condiciona dois dos requisitos indispensáveis à corrosão. Para teores de água muito elevados, a presença de oxigénio junto das armaduras é condicionada pela permeabilidade do betão a este elemento, podendo apresentar valores bastante baixos. Nestes casos, a corrosão é controlada pelo processo catódico e a taxa de corrosão diminui à medida que o teor de água aumenta. Por outro lado, para baixos teores de água, o processo passa a ser controlado pela resistividade do betão, sendo que a taxa de corrosão decresce com o aumento desta. De acordo com Bertollini et al. (2004), para um limite mínimo de humidade relativa de 80%, a corrosão em betões de elevada qualidade sem contaminação de cloretos perde relevância (Neville (1995) reporta um valor de 60%). Porém, se existir contaminação de cloretos, este valor diminui consoante o teor de cloretos e tipo de sal associado, podendo chegar aos 40%.

2.5. Ingresso de cloretos no betão

Tipicamente, os iões cloreto contaminam as estruturas de betão armado de duas formas: provenientes do meio ambiente e penetrando o betão ou fazendo parte da constituição dos elementos integrantes do betão. A segunda forma é menos frequente e mais fácil de controlar. Nos dias de hoje, os documentos normativos, como a EN 206 (2007), impõe limites máximos para os teores de cloretos nos constituintes do betão (Neville 1995, Kropp 1995). Este aspeto não era considerado no passado e muitas estruturas deterioraram-se precocemente devido a este fator (Schiessl 1996). Assim, a principal fonte de cloretos no betão é aquela proveniente do ambiente exterior. Por norma, a água salgada (proveniente de regiões marítimas) e os sais descongelantes utilizados em estruturas rodoviárias ou processos industriais são as duas maiores fontes de cloretos a afetar as estruturas de betão (Kropp 1995).

A penetração de cloretos no betão pode ocorrer de diversas formas: difusão, absorção capilar, permeação, ou ainda uma combinação de dois ou mais dos mecanismos de transporte indicados (Poulsen e Mejlbro 2006, Bogas 2011). Considerando um ambiente marítimo, o ingresso de cloretos é feito tipicamente por absorção capilar nas zonas superficiais do betão e por difusão para o seu interior. A exceção acontece nas zonas submersas onde a penetração é feita essencialmente por difusão (Kropp 1995).

A difusão de cloretos para o interior do betão é controlada essencialmente pelo teor em água e pela dimensão e continuidade da estrutura porosa. Embora não tão relevantes, a temperatura e a capacidade de fixação de cloretos são outros fatores que influenciam a forma como ocorre a difusão de cloretos (Bogas 2011). O teor em água é considerado um aspeto importante, uma vez que a difusão de cloretos apenas ocorre quando este teor é suficiente para que se estabeleçam passagens contínuas de água nos poros capilares. Caso as passagens contínuas de água sejam interrompidas (por auto-dessecação, por exemplo), o mecanismo de difusão também é interrompido (Kropp 1995). Segundo Kropp (1995), um teor de água a rondar os 60 a 80% HR é o limite para o processo de difusão ocorrer de forma significativa. Naturalmente, a difusão tende a diminuir nos betões de menor a/c (Bogas 2011, Odriozola e Gutierrez 2007, Real et al. 2015, Liu et al. 2017, Costa e Appleton 1999, Moffatt e Thomas 2018). Neste caso, ocorre um refinamento na microestrutura do betão, aumentando assim a sua compacidade e resistência à penetração de cloretos.

De acordo com Thomas (2016) a escolha de um ligante apropriado pode ajudar a aumentar a resistência do betão à penetração de cloretos, uma vez que alguns ligantes são capazes de fixar uma quantidade significativa de cloretos no interior do betão, conforme abordado em 2.5.8.

A temperatura a que a estrutura de betão está exposta também condiciona a penetração de cloretos. O seu aumento provoca um decréscimo na capacidade de fixação do betão, aumentando assim o risco de corrosão.

2.5.1. Teor crítico de cloretos

Tal como referido em 2.4, a película passiva formada em volta das armaduras pode ser destruída na presença de uma dada quantidade de cloretos. Nesse sentido, o teor crítico de cloretos é definido como a concentração limite a partir da qual a armadura é despassivada e o processo de corrosão induzido por cloretos é iniciado (Poulsen e Meljbro 2006, Bertollini et al. 2004, Angst et al. 2009, Abbas et al. 2018). Segundo Bertollini et al. (2004) e Neville (1995), o teor crítico de cloretos é difícil de determinar por não ser um valor constante e por variar significativamente consoante as características do betão. Para além disso, a forma como o teor crítico de cloretos deve ser expressa ainda gera bastante controvérsia.

Angst et al. (2009) afirma que, de forma geral, é comum expressar-se este parâmetro como o teor de cloretos totais por massa de ligante ou de betão, como teor de cloretos livres por massa de ligante ou de betão (assumindo que os iões cloretos fixados no interior do betão são removidos definitivamente da solução dos poros e não interferem com o processo de corrosão) ou ainda como um rácio entre a concentração de iões cloreto e de hidróxido na solução dos poros $[Cl^-/OH^-]$. Devido à complexidade na determinação do teor crítico de cloretos, ainda não existe uma forma de o determinar que seja precisa e universalmente aceite (Torres-Luque, et al. 2014). No entanto, nos EUA e Europa é comum definir um limite conservativo para o teor crítico de cloretos de 0,4-0,5% por massa de ligante (Angst, et al. 2009). Por outro lado, Hausmann

(1967) estudou a relação entre a probabilidade de corrosão e o rácio $[Cl^-/OH^-]$, tendo proposto um valor crítico de 0,6.

Como referido, o teor crítico de cloretos é afetado por inúmeros fatores, destacando-se: o pH da solução dos poros, o potencial eletroquímico das armaduras, o tipo de ligante, a interface aço-betão (presença de vazios), a temperatura, o teor de humidade do betão, a disponibilidade de oxigénio junto às armaduras, a relação a/c, a resistividade elétrica do betão, o grau de hidratação da pasta de cimento e até a composição química do aço das armaduras (Bertollini et al. 2004, Kropp 1995, Cigna et al. 2002). Apesar da lista de fatores ser extensa, muitos destes fatores são relacionáveis entre si.

O potencial eletroquímico do aço das armaduras relaciona-se diretamente com o pH da solução dos poros e com a disponibilidade de oxigénio à superfície do metal (como tal, a humidade do betão). Bertollini et al. (2004) afirma que à medida que o potencial eletroquímico diminui, o teor crítico de cloretos aumenta (por vezes com ordem de magnitude superior a 1). Segundo o mesmo autor, a disponibilidade de oxigénio junto às armaduras provoca um decréscimo no teor crítico, enquanto que em ambientes onde o acesso de oxigénio é limitado (betões saturados), o valor de concentração crítica aumenta.

A presença de vazios, fendas ou microfendilhação provoca uma redução no teor crítico de cloretos (Yu, et al. 2010). Os vazios na interface entre o aço e o betão, resultado de uma deficiente compactação do betão, prejudica a camada de produtos de hidratação formados nesta zona, favorecendo assim uma acidificação local que contribui para a propagação da corrosão por picadas (Bertollini et al. 2014).

A relação a/c e o grau de hidratação influenciam a porosidade da pasta e conseqüentemente a disponibilidade de oxigénio e humidade junto das armaduras. Poupard et al. (2004) concluíram que uma redução na relação a/c e aumento no grau de hidratação provocam a subida do teor crítico de cloretos.

2.5.2. Capacidade de fixação de cloretos

À medida que os iões se difundem pela estrutura porosa, é reconhecido que parte destes iões promovam ligações físicas ou químicas com alguns elementos da pasta de cimento (Poulsen e Mejlbro 2006, Kropp 1995). Ao rácio entre o teor de cloretos combinados e o teor total de cloretos dá-se o nome de “capacidade de fixação de cloretos” (Kropp 1995).

Assim, os iões cloreto podem existir no interior do betão sob diversas formas: quimicamente fixados a compostos do betão como C_3A ou C_4AF , formando cloroaluminatos; fisicamente adsorvidos aos C-S-H de elevada área superficial por ação de forças de superfície; na forma livre (Neville 1995, Poulsen e Mejlbro 2006, Yuan et al. 2009, Kropp 1995).

A capacidade de fixação de cloretos é uma característica relevante do betão por diversas razões: permite diminuir o teor de cloretos livres na proximidade das armaduras (reduzindo a probabilidade de se atingir o teor crítico de cloretos); permite reduzir o teor de iões cloreto que

participa na difusão, retardando assim a penetração de cloretos até à profundidade das armaduras; promove a formação de cloroaluminatos, também conhecidos como *sal de Friedel* (através da reação dos iões com os compostos C_3A ou C_4AF) que ajuda a refinar a microestrutura do betão e a retardar a penetração de cloretos (Yu, et al. 2010).

Segundo Yu et al. (2010), muitos autores consideravam que os iões cloreto fixados deixavam de contribuir para a iniciação do processo de corrosão, sendo apenas os cloretos livres responsáveis por tal fenómeno. No entanto, Glass e Buenfeld (2000) referiram que mediante determinadas condições, os iões cloreto fixados podem ser libertados, contribuindo igualmente para este processo. De facto, a redução do pH do betão pode destabilizar os cloroaluminatos formados e levar à libertação de iões cloreto inicialmente combinados (Ann e Song 2007). Neste caso, a carbonatação do betão pode levar à diminuição da capacidade de fixação do betão (Neville 1995). Ainda assim, Tritthart (1989) afirma que para valores de pH superiores a 12,6 a capacidade de fixação de cloretos diminui com o aumento da concentração de iões OH^- no betão.

A capacidade de fixação depende de vários parâmetros, sendo os mais relevantes a composição química do betão, a estrutura porosa do betão, a temperatura, a concentração de cloretos, a carbonatação do betão e o tipo de catião do sal (Bertollini et al. 2004, Kropp 1995, Arya e Xu 1995). O tipo e dosagem de adições no betão também tem um papel relevante na capacidade de fixação (Kropp 1995). Neville (1995) afirma que para cimentos com maior proporção de C_3A , a capacidade de fixação é superior, dado que se promove a formação de cloroaluminatos, (fib1 1999, Kropp 1995). Do mesmo modo, mas em menor proporção, também ocorrem reações com o C_4AF do cimento. Dhir et al. (1994) afirmam que a concentração de cloretos no interior do betão influencia a sua fixação. Segundo os autores, quanto maior a concentração deste tipo de ião na solução dos poros, maior será o teor de cloretos fixados. Relativamente à temperatura, foi constatado por vários autores que à medida que esta aumenta, a quantidade de cloretos fixados tende a descer (Larsson 1995, Roberts 1962).

2.5.3. Coeficiente de difusão, D_{Cl}

Apesar do mecanismo principal de ingresso de cloretos na região superficial do betão não saturado ser a absorção capilar, a progressão de cloretos para regiões mais internas ocorre por difusão (Hetek53 1996). O mesmo sucede nos betões submersos, mas neste caso a difusão domina o mecanismo de penetração de cloretos no betão em toda a sua espessura. Como consequência, pode-se considerar que o mecanismo de difusão domina o transporte de cloretos para o interior do betão, a longo prazo (Nanukuttan, et al. 2015). Neste caso, a resistência à penetração de cloretos pode ser associada à determinação do coeficiente de difusão de cloretos no betão, D_{Cl} , aplicando as leis de Fick, conforme discutido em 2.5.6.

Assim, o coeficiente de difusão, D_{Cl} , é considerado o parâmetro mais relevante para caracterizar o ingresso e transporte de iões cloreto no betão, sendo por isso, um excelente indicador relativamente à capacidade de resistência à penetração de cloretos do betão (“Chloride resistance of concrete”, 2009)

Em geral, o coeficiente de difusão de cloretos no interior do betão apresenta valores que rondam tipicamente os 10^{-12} m²/s (Costa e Appleton 1999, Sandberg 1995). Porém, este parâmetro pode assumir diferentes significados, consoante a difusão ocorra em regime estacionário ou não estacionário, com presença ou não de outros mecanismos de transporte (absorção capilar, migração), incidindo sobre o transporte de cloretos livres ou totais, e consoante seja o resultado de uma medição instantânea ou ao longo do tempo. Desse modo, na literatura são reportados vários valores para o coeficiente de difusão do betão que não podem ser diretamente comparáveis.

Segundo Bertolini et al. (2004), o coeficiente de difusão varia consoante a estrutura porosa do betão e todos os fatores que a influenciam (relação a/c, compactação do betão, tempo de cura e presença de microfendilhação), e também consoante o tipo de ligante do betão. Zhang e Gjorv (1996) indicam que a composição da solução salina em contacto com o betão também influencia o coeficiente de difusão.

Costa e Appleton (1999) conduziram um estudo experimental onde diversos painéis de betão armado foram sujeitos a diferentes condições de exposição em ambiente marítimo. Segundo os mesmos, os coeficientes de difusão obtidos variaram segundo três parâmetros: qualidade do betão, condições de exposição e tempo de exposição. Os autores observaram que a diferença no desempenho dos betões é tanto mais acentuada, quanto mais agressivas forem as condições de exposição. Verificaram igualmente que a diferença de comportamento para provetes do mesmo tipo, nas várias condições de exposição, é atenuada à medida que aumenta a qualidade do betão. As condições de exposição influenciam o coeficiente de difusão, na medida em que a interação do ambiente com o betão, define o teor de humidade no seu interior.

É reconhecido por vários autores que o coeficiente de difusão diminui com o tempo de exposição, independentemente do tipo de betão e condições de exposição (Andrade et al. 2011, Real e Bogas 2018) Este fenómeno é, em parte, explicado pela hidratação do cimento e reações pozolânicas que ocorrem ao longo do tempo. Os produtos formados ajudam o refinamento da microestrutura do betão, reduzindo conseqüentemente a porosidade do mesmo e dificultando a progressão dos iões cloreto. No entanto, este não é o único fator responsável pela redução do coeficiente de difusão ao longo do tempo, não existindo ainda uma justificação para esta tendência (Poulsen e Meljbro 2006).

Liu et al. (2017), utilizando o ensaio acelerado de migração de cloretos no seu estudo, afirmam que o D_{Cl} diminui de forma evidente com o incremento do tempo de cura, sendo que esta descida é mais significativa dos 28 para os 90 dias, relativamente ao intervalo entre os 90 e 180 dias. Isso está de acordo com a tendência geralmente referida de D_{Cl} variar com t^{-n} (Poulsen e Meljbro 2006, Petcherdchoo 2013).

2.5.4. Concentração superficial de cloretos, C_s

O valor da concentração superficial de cloretos, C_s , depende da composição do betão, das condições micro-ambientais em que este se insere, das condições de exposição e da

temperatura (Bertollini et al. 2004, Andrade et al. 2011). Poulsen e Meljbro (2006) reportam expressões simplificadas para estimar C_s ao longo do tempo, em que este fator tende a aumentar com a relação a/c. Ainda assim, Real e Bogas (2018) e Costa & Appleton (1999) não verificam uma relação clara entre C_s e a composição do betão.

Em relação à influência do tempo de exposição, tal como referido para o coeficiente de difusão, verifica-se que C_s tende a aumentar ao longo do tempo (Andrade et al. 2011, Costa e Appleton, 1999, Swamy, et al., 1994, Real e Bogas 2018). No entanto, para longos períodos de exposição, considera-se que C_s acaba por estabilizar num dado valor, em especial quando as estruturas se inserem em ambiente de classe XS2. De facto, em região submersa, o teor de cloretos à superfície tem tendência a estabilizar após um curto período de tempo. Esta estabilização acontece após se atingir o equilíbrio entre os cloretos existentes na água do mar e na camada mais superficial da estrutura de betão.

Por outro lado, na região de rebentação e de maré este parece aumentar de forma mais prolongada com o tempo (Poulsen e Meljbro 2006, Bertollini et al. 2004, Costa e Appleton, 1999).

Nestas regiões, durante o período de molhagem os cloretos penetram no betão, enquanto que no período de secagem estes cristalizam sob a forma de sal, levando à acumulação de cloretos na zona superficial do betão (Real e Bogas 2018). Como consequência, o teor de cloretos no interior do betão, mas junto à superfície, tem tendência a formar um pico de concentração, que avança em profundidade com o tempo. Este aumento de concentração para o interior do betão faz aumentar o teor de C_s fictício, calculado a partir da aplicação direta da segunda lei de Fick, mesmo que o valor real de C_s seja pouco afetado (Bogas 2011). A exposição da superfície à água da chuva pode provocar a lixiviação superficial dos cloretos, afetando igualmente o valor de C_s (Neville 1995). Para betões sujeitos a XS3, Real e Bogas (2018) reportam valores de C_s compreendidos entre 1,19 e 5,65% de massa de ligante, após 3 anos de exposição. Em classe XS2, os autores reportam valores compreendidos entre 1,08 e 2,59% de massa de ligante, tendo em conta betões de igual composição sujeitos ao mesmo período de exposição.

Na zona atmosférica o valor de C_s é determinado pela deposição de cloretos, que acontece de forma progressiva ao longo do tempo. Assim, nesta zona a orientação do vento, a distância à fonte de cloretos (tipicamente a orla costeira), a altura dos elementos e a exposição à água das chuvas influenciam significativamente a concentração superficial de cloretos (Bertollini et al. 2004, Bogas 2011, Costa 1997). No estudo de Real e Bogas (2018), esta foi a condição de exposição onde os valores da concentração superficial de cloretos foram menos elevados, variando entre 0,16 e 0,52% de massa de ligante, após 3 anos de exposição.

2.5.5. Leis de difusão

Em regime estacionário e fluxo unidimensional, a difusão de substâncias para o interior do betão, rege-se pela primeira lei de Fick (2.1):

$$F = -D \cdot \frac{\partial c}{\partial x} \quad (2.1)$$

Onde F corresponde ao fluxo de iões, $\frac{\partial c}{\partial x}$ corresponde ao gradiente de concentração ao longo da distância x e D é o coeficiente de difusão, medido em m²/s. No entanto, esta equação é apenas válida após se obter um regime estacionário, onde a concentração de iões permanece aproximadamente constante ao longo do tempo numa dada posição x.

Quando os iões se difundem para o interior do betão ocorre uma variação da concentração, C, ao longo do tempo t e em qualquer ponto x do betão, então estamos perante um regime não estacionário (Poulsen e Mejlbro 2006). Para este tipo de regime, a difusão de iões rege-se pela segunda lei de Fick, também conhecida como equação de “balanço de massa” (Eq. (2.2)):

$$\frac{\partial c}{\partial t} \cdot dx = F - \left\{ F + \frac{\partial F}{\partial x} \cdot dx \right\} = -\frac{\partial F}{\partial x} \cdot dx \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial F}{\partial x} \quad (2.2)$$

A segunda lei de Fick (Eq.2.2), afirma que a variação na concentração dos iões por unidade de tempo, é igual à variação de fluxo de iões por unidade de comprimento. Aplicando a primeira lei de Fick em (2.2) e admitindo que o coeficiente de difusão é independente da posição x, podemos reescrever a segunda lei de Fick na seguinte forma Eq. (2.3):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2.3)$$

A resolução desta equação diferencial é possível mediante a definição das condições iniciais e das condições de fronteira do betão. Existem diversos modelos propostos atualmente, que pretendem modelar a penetração de cloretos no betão com base na segunda lei de Fick (Eq.(2.3)), sendo os modelos de Collepardi, Lightcon e Hetek alguns dos mais comuns. No modelo mais simples, em que se admite que D_{cl} e C_s são constantes ao longo do tempo, a solução da Eq.(2.3) pode ser dada por Eq.(2.4), em que se consideram as seguintes condições de fronteira: $c(0,t) = c_s$ e $c(x,0) = c_i$ (Poulsen e Mejlbro, 2006, Mehta e Monteiro, 2006). Na Eq.(2.4), $\text{erfc}()$ é a função complementar de erro, $c(x,t)$ é o teor de cloretos à profundidade x e instante t, (kg/m³), c_i é o teor inicial de cloretos no betão, (kg/m³) e c_s o teor de cloretos na superfície (kg/m³) (Bogas 2011, Poulsen e Mejlbro 2006).

$$c(x,t) = c_i + (c_s - c_i) \cdot \left[\text{erfc} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{cl} \cdot t}} \right) \right] \quad (2.4)$$

2.5.6. Ensaios de determinação da resistência à penetração de cloretos no betão

Como referido, a difusão é considerada o mecanismo predominante de transporte de iões cloreto no interior do betão (Azad 1998). Assim, é natural que o coeficiente de difusão seja um bom indicador quanto à suscetibilidade de penetração de cloretos no betão. À medida que o valor de D_{cl} aumenta, maior é o ritmo de penetração de cloretos no betão e, portanto, maior será a acumulação destes iões no interior do mesmo. Os métodos laboratoriais existentes para a

avaliação da difusão de iões no betão podem-se categorizar em ensaios de difusão ou migração, dividindo-se ainda em estacionários ou não estacionários (Bogas 2011).

Ao longo do tempo foram desenvolvidos diversos ensaios, por variados autores, que visavam determinar parâmetros que pudessem classificar o betão quanto à sua resistência à penetração de cloretos. De entre vários métodos, o grupo de trabalho Chlortest (2005) selecionou os ensaios de imersão (NTBUILD443 1995), de migração de cloretos acelerada em regime não estacionário (NTBUILD492 1999) e de resistividade como os mais indicados para se incluírem numa futura normalização Europeia. Na documentação normativa Portuguesa, para além dos dois primeiros ensaios referidos, também se inclui o método de célula de difusão (LNEC E 383, 1993).

É de notar, que por norma não é feita a distinção entre cloretos livres e cloretos fixados. Assim, para ensaios em regime não estacionário o coeficiente de difusão real tende a ser subestimado e deve-se fazer uso do termo coeficiente de difusão aparente (Bogas 2011, Poulsen e Meljbro 2006, Spiesz e Brouwers, 2013). Segundo Spiesz e Brouwers (2013), o coeficiente de difusão aparente torna-se equivalente ao real nos casos em que não exista fixação de cloretos ou onde a fixação de cloretos se encontre estagnada ou terminada.

Ao longo da campanha experimental do presente trabalho, a resistência à penetração de cloretos foi caracterizada com recurso ao ensaio de imersão, seguindo a NTBUILD433 (1995), e ao ensaio acelerado de migração em regime não estacionário (RCMT), de acordo com a NTBUILD492 (1999).

O ensaio acelerado de migração de cloretos foi inicialmente introduzido por Tang e Nilsson (1992). O objetivo passava por obter coeficientes de difusão de forma mais célere que os obtidos em ensaios de difusão natural, acelerando o ingresso de cloretos no betão com a aplicação de uma diferença de potencial elétrico (Spiesz e Brouwers 2013). Tratando-se de um ensaio em regime não estacionário, o coeficiente de difusão obtém-se com recurso à segunda lei de Fick (expressão modificada), como referido em 3.8.3. De acordo com o grupo de trabalho Chlortest (2005), este ensaio apresenta em média um coeficiente de variação de 15% para a repetibilidade e de 24% para a reprodutibilidade.

Gjørsv (1996) propôs um critério de forma a classificar a resistência à penetração de cloretos no betão, de acordo com o coeficiente de difusão, $D_{Cl,RCMT}$, obtido no ensaio acelerado de migração de cloretos (Anexo F - Quadro F.1).

Tal como referido, a grande vantagem deste ensaio é a simplicidade e rapidez com que é executado. A duração dos ensaios varia entre 9 e 96 horas, levando na maioria dos casos 24 horas (Chlortest 2005). Por outro lado, o reduzido tempo de ensaio e o forte campo elétrico aplicado levam a que o teor de cloretos fixados seja menor, relativamente aos ensaios de difusão natural. Assim, o parâmetro $D_{Cl,RCMT}$ obtido neste ensaio, descreve o transporte de cloretos no betão para condições de baixa capacidade de fixação (Chlortest 2005). Este facto pode ter particular relevância, em betões com adições pozolânicas.

O ensaio de imersão consiste na submersão de provetes de betão numa solução salina. A elevada salinidade da solução provoca gradientes de concentração significativos, que propiciam a difusão de iões para o interior do betão. Após um período de exposição previamente definido (nunca inferior a 35 dias, segundo a norma NTBUILD443 (1995), são construídos perfis de cloretos a partir dos quais se obtêm o coeficiente de difusão, D_{Cl} , e a concentração superficial de cloretos, C_s . Isto é conseguido, determinando a curva teórica definida pela segunda lei de Fick, que melhor se ajusta ao perfil de cloretos obtido (Bogas 2011, Chlortest 2005). O processo utilizado neste trabalho é descrito em 3.8.4.

A principal desvantagem deste tipo de ensaio é a exigência de longos períodos de exposição, podendo demorar alguns meses ou até anos. Por outro lado, neste ensaio (contrariamente ao que acontece no ensaio RCMT) é tido em conta a interação física e química existente entre os cloretos e a pasta de cimento hidratada.

Dado que os valores de D_{Cl} e C_s se encontram acoplados, devido ao ajustamento da curva teórica ao perfil de cloretos obtido, deve-se analisar os parâmetros em conjunto (Chlortest 2005). Assim, é comum calcular um parâmetro de penetração, K_{cr} (mm/\sqrt{ano}), que permite combinar a influência de D_{Cl} e C_s e facilitar a comparação de resultados entre diferentes tipos de betão (NTBUILD443 1995, Chlortest 2005). Este parâmetro diz respeito à penetração de uma dada concentração crítica de cloretos, c_r , num dado período de tempo de exposição, t_i , sob condições constantes. O seu cálculo é referido em 3.8.4.

De acordo com o grupo de trabalho Chlortest (2005), este ensaio apresenta em média um coeficiente de variação de 20%, 18% e 9% para a repetibilidade dos parâmetros D_{Cl} , C_s e K_{cr} respetivamente e um coeficiente de variação de 28%, 24% e 18% para a reprodutibilidade dos parâmetros D_{Cl} , C_s e K_{cr} , respetivamente.

Tang, et al. (2010) tentaram correlacionar os valores de coeficiente de difusão obtidos no ensaio RCMT com os obtidos no ensaio de imersão. No mesmo trabalho, compilaram ainda os resultados de outros autores (Fredriksen et al. 1997, Tang e Sørensen, 2001, Chlortest 2005 e Castellote e Andrade 2006) que tentaram estabelecer o mesmo tipo de correlação. De uma forma geral, Tang et al. (2010) concluíram que é possível estabelecer uma relação entre valores de D_{Cl} obtidos através do ensaio RCMT e os obtidos através do ensaio de imersão. A mesma conclusão é obtida por Bogas (2011). O autor destaca ainda o facto de os valores de coeficiente de difusão obtidos no ensaio de imersão (para 8 meses de imersão) serem sistematicamente inferiores aos obtidos no ensaio RCMT. A diferença na idade inicial e na duração dos ensaios contribuíram para a tendência observada.

2.5.7. Betão estrutural de agregados leves

Tal como o nome indica, a massa volúmica é a principal característica diferenciadora entre um betão de agregados naturais (BAN) e um betão de agregados leves (Bogas 2011).

A Norma Europeia NP EN 206-1 (2007), define os betões de acordo com a sua massa volúmica, após secagem em estufa. Segundo a mesma, um betão é classificado como leve se possuir uma massa volúmica entre 800kg/m^3 e 2000kg/m^3 . Dado que os agregados são o componente do betão que mais influencia a sua massa volúmica (FIP 1983), a sua substituição total ou parcial por agregados leves terá um efeito mais significativo na mesma.

Assim como o betão, os agregados de origem mineral também são classificados consoante a sua massa volúmica, ou baridade. As normas Europeias NP EN 206-1 (2007) e EN 13055-1 (2005), definem um agregado como leve se a sua massa volúmica, após secagem em estufa, for inferior a 2000kg/m^3 , ou a sua baridade não ultrapassar os 1200kg/m^3 .

Em relação à durabilidade dos betões estruturais de agregados leves (BEAL), a principal diferença face aos BAN resulta das características dos agregados leves e respetiva interação com as restantes fases do betão. Segundo Bogas (2011), os agregados leves apresentam uma rede de poros interconectados tridimensionalmente, com dimensões maioritariamente na gama de 1 a $300\mu\text{m}$, cerca de duas ordens de grandeza superiores aos poros de matrizes cimentícias usualmente considerada em betões correntes. Assim, os agregados leves apresentam penetrabilidades superiores à pasta de cimento. Tal como referido em 2.3, um material poroso não implica necessariamente que seja permeável, no entanto, é expectável que se a microestrutura de um betão for conectável, um aumento na porosidade do agregado implique uma maior penetrabilidade (Liu et al. 2010). Neste caso, matrizes de maior a/c deverão proporcionar uma maior participação do agregado na permeabilidade (Real et al. 2015).

Segundo Zhang e Gjørsv (1989), para os BAN a zona de interface agregado-pasta é considerada o elo mais fraco de toda a microestrutura do betão.

Uma das razões está relacionada com o efeito de parede proporcionado pelo agregado, conduzindo a uma relação a/c mais elevada nestas regiões. Segundo Pla et al. (2018) e FIP(1983) a presença de microfendilhação na zona de transição dos BAN, devido a diferenças relevantes entre o módulo de elasticidade do agregado e da pasta, também contribui para o aumento de permeabilidade desta zona.

Assim, devido ao elevado volume de agregados presente no betão, a probabilidade destas regiões de interface se intercetarem e estabelecerem passagens contínuas para o transporte de substâncias é elevada, podendo ter um papel essencial na permeabilidade do betão (Garboczi 1995).

No entanto, é reconhecido que os agregados leves proporcionam uma zona de transição de melhor qualidade, associada a maiores compacidades (Zhang e Gjørsv 1989, Bogas 2011, Pla et al. 2018, Henkensiefken et al. 2009, Wasserman e Bentur 1996). Um dos aspetos que explica este fenómeno é a cura interna providenciada pelos agregados leves (Pla et al. 2018), em que devido à sua elevada porosidade e teor de humidade, são capazes de funcionar como reservatórios de água espalhados pelo betão.

Por outro lado, nos BEAL a compatibilidade elástica entre a pasta de cimento e os agregados é superior, diminuindo assim os níveis de microfendilhação. De acordo com o FIP (1983), esta é a principal razão para os BEAL apresentarem permeabilidades similares, ou até inferiores, face aos BAN. No entanto, Zhang e Gjørsv (1991c) verificam que à medida que a resistência da matriz é incrementada, a permeabilidade dos BEAL pode tornar-se superior à dos BAN de igual resistência devido ao incremento da rigidez da pasta e consequente incompatibilidade elástica.

Apesar dos agregados leves apresentarem tipicamente uma porosidade elevada, estes possuem uma película exterior, cuja densidade depende do tipo de agregado, e que pode dificultar o ingresso de substâncias para o seu interior. Zhang e Gjørsv (1989) reportam que à medida que a densidade da película exterior do agregado leve aumenta, as características da zona de transição tornam-se cada vez mais similares àquelas observadas nos BAN. Segundo os mesmos autores, para agregados leves com película exterior mais fraca e porosa, a interface agregado-pasta apresenta maior homogeneidade e compactidade. Vaysburd (1992) sugere que a penetração nos BAN se procede preferencialmente pela pasta e zona de transição, enquanto que nos BEAL ela ocorre essencialmente pela pasta de cimento devido à elevada qualidade da zona de interface.

Para igual nível de resistência, os BEAL são usualmente associados a pastas de menor relação a/c e menor volume de agregados do que os BAN (Bogas 2011). Assim, para pastas de qualidade superior e zonas de transição compactas e homogêneas, os agregados leves acabam por ser isolados pela mesma e ter menos relevância na permeabilidade do betão (Bogas 2011). Desse modo, vários autores reportam que a durabilidade dos BEAL é governada essencialmente pela qualidade da pasta de cimento (Zhang e Gjørsv 1991, Hammer 1995, Bogas 2011, Real et al. 2015).

A penetração de cloretos no betão depende dos coeficientes de difusão na pasta, zona de transição e agregados, sendo comumente aceite que os últimos apresentam tipicamente maiores difusibilidades (Zhang e Gjørsv 1995). Vários estudos, baseados essencialmente em resultados de ensaios acelerados laboratoriais, demonstram que a resistência à penetração de cloretos nos BEAL tende a ser, pelo menos, semelhante à dos BAN (Helland e Selmer 2000, Bogas 2011, Chia e Zhang 2001, Cortês 2014), em especial nos betões de moderada a elevada resistência e agregados leves de maior massa volúmica.

Chia e Zhang (2001) realizaram um estudo onde pretendiam estudar a resistência à penetração de cloretos em BEAL de alta resistência. A partir de uma série de ensaios de imersão e de migração acelerados, concluíram que houve um progressivo incremento na resistência à penetração de cloretos segundo a seguinte ordem: BEAL; BEAL de elevada resistência; BEAL de elevada resistência e com sílica de fumo como adição. Para os BAN correspondentes de igual composição, verificaram a mesma tendência. Após pulverização dos provetes seccionados com solução de nitrato de prata, observou-se que os iões cloreto não penetraram os poros dos agregados. Isto pode dever-se à elevada qualidade da zona de interface e à película exterior presente nos agregados leves. Os autores concluíram assim, que a qualidade da pasta é o

principal fator responsável pela penetração de cloretos no betão. Liu et al. (2010), Pla et al. (2018), Real e Bogas (2018), Zhang e Gjorv (1995), Bogas (2011), Bogas e Gomes (2015) e Moffatt e Thomas (2018) chegaram a conclusões semelhantes nos seus trabalhos.

Bogas e Gomes (2015) concluíram que independentemente do ensaio de penetração de cloretos utilizado, o tipo de agregado não influenciou os coeficientes de difusão obtidos. Verificaram que a resistência à penetração de cloretos nos BEAL com relação a/c inferior a 0,45 tende a ser similar ao dos BAN de igual composição e tende a ser superior ao dos BAN da mesma classe de resistência. Um período de cura mais prolongado resultou em coeficientes de difusão mais baixos, em especial para betões com agregados leves mais porosos.

Real e Bogas (2018) estudou a penetração de cloretos em BEAL expostos a diferentes ambientes marítimos reais confirmando que o coeficiente de difusão dos BEAL tende a ser similar ao dos BAN de igual composição, independentemente do tipo de agregado e tipo de exposição, para relações a/c inferiores a 0,55. O coeficiente de difusão foi essencialmente afetado pela qualidade da pasta, nomeadamente a relação a/c e o tipo de ligante. No entanto, os BEAL tenderam a apresentar maiores valores de C_s e maiores teores de cloretos a uma dada profundidade. Para BEAL com agregados leves mais densos, a penetração de cloretos equiparou-se à dos BAN.

2.5.8. Influência de adições no betão

De um modo geral, a introdução de adições para além de contribuir para a produção de betões mais sustentáveis, pode ainda melhorar as características do mesmo, tanto no estado fresco, como no estado endurecido. No presente trabalho foram utilizados os três tipos de adições correntes a nível nacional: cinzas volante, sílica de fumo e filler calcário.

As cinzas volantes são um subproduto da combustão de carvão em centrais termoelétricas, possuindo geralmente forma esférica e um diâmetro médio de $10\mu\text{m}$ (Neville 1995). As suas características permitem o desenvolvimento de reações pozolánicas na presença de hidróxido de cálcio do cimento, embora estas ocorram de forma lenta. Assim, em betões com incorporação de cinzas volantes, o tempo de cura é um fator bastante relevante nas propriedades do mesmo (Neville 1995, Bogas 2011, Andrade et al. 2011, Liu et al. 2017, Thomas e Bamforth 1999).

Relativamente à resistência à compressão, foi observado por diversos autores que as cinzas volantes têm um efeito prejudicial nas idades iniciais, sendo que para idades mais avançadas os betões acabam por atingir resultados pelo menos similares ao de betões com apenas CEM I (Bogas 2011, Lo 2004, Shafigh et al., 2013).

De uma forma geral, considera-se que a adição de cinzas volantes tem um efeito benéfico na mitigação da corrosão induzida por cloretos (Shi et al. 2011). Dhir et al. (1997) concluíram que a capacidade de fixação da pasta de cimento aumenta com o incremento gradual da percentagem de substituição de cimento por cinzas volante, até um máximo de 50%. Este fenómeno pode ser explicado pela elevada concentração de aluminatos presente nas cinzas volante. A fixação dos

ões cloreto é conseguida através da combinação destes com os aluminatos, com a consequente formação de sal de Friedel (Dhir e Jones 1999, Arya e Xu 1995). Por outro lado, a adição de cinza conduz a um aumento das fases de C-S-H, incrementando também a fixação de cloretos por adsorção (Kropp 1995). Porém, segundo Thomas (1996), a utilização de cinzas volante tem um efeito prejudicial no teor crítico de cloretos, levando a que este valor diminua com o aumento da percentagem de adição. O autor reportou valores de teor crítico de 0,7%, 0,65%, 0,5% e 0,2% de massa de ligante, para adições de 0%, 15%, 30% e 50%, respetivamente. A redução do pH da solução dos poros provocada por este tipo de adição é a explicação dada pelo autor para tal comportamento. Tendências similares foram obtidas por Oh et al. (2003), sendo que Alonso et al. (2000) e Schiessl e Breit (1996) reportaram valores similares ou superiores no teor crítico de cloretos de betões com cinzas.

No que diz respeito ao coeficiente de difusão obtido em ensaios acelerados a idades jovens, Real et al. (2015) concluíram que a tendência passa por um acréscimo deste valor, com o aumento da percentagem de adição. As razões apontadas pelos autores foram o reduzido período de cura húmida e a idade precoce a que foram feitos os ensaios (28 dias). Os autores recomendam que para betões com adições pozolânicas de reatividade lenta, os ensaios de resistência à penetração de cloretos sejam realizados para idades mais avançadas, onde a contribuição real deste tipo de adições seja tida em conta.

Para idades de ensaio mais avançadas, Yoo et al. (2010) reportam (para betões com cinza volante e relações a/l entre 0,4 e 0,55) valores de D_{cl} , obtidos através de ensaio de imersão, entre 6,8 e $15,2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, aos 91 dias, e entre 2,7 e $6,7 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ aos 330 dias. Aos 91 dias, reportaram valores similares aos obtidos para betões apenas com cimento tipo I, enquanto que para a idade mais avançada (330 dias), a adição de cinza volante teve um efeito claramente benéfico relativamente ao betão de referência. Constataram igualmente, que para o ensaio aos 330 dias, o coeficiente de difusão foi tanto menor, quanto maior a percentagem de adição de cinzas volante no betão.

De acordo com Thomas (1999), o valor de D_{cl} em betões com cinza volante e dois anos de idade, pode ser inferior em cerca de uma ordem de magnitude, comparativamente a um betão sem adições.

Segundo Real e Bogas (2018), a incorporação de cinzas volante no betão provoca um aumento na concentração superficial de cloretos, independentemente do tipo de betão. Os autores sugerem que a diminuição do valor de D_{cl} , associada aos betões com adição de cinzas, possa provocar uma maior concentração de cloretos nas camadas mais superficiais do betão, influenciando o valor de C_s . Tendências semelhantes foram observadas por Song et al. (2008).

Moffatt e Thomas (2018) concluíram que a utilização de adições (cinza volante e sílica de fumo), independentemente do tipo e quantidade, resultou numa melhoria de desempenho dos betões. No entanto, a redução da relação a/c mostrou-se mais eficaz, comparativamente à utilização de adições. Concluíram ainda que a redução na penetrabilidade de cloretos em betões com adições,

compensou qualquer possível decréscimo no teor crítico de cloretos que estas possam ter provocado, reduzindo assim a probabilidade de ocorrer corrosão nas armaduras.

A sílica de fumo é um subproduto industrial resultante do fabrico de silício e ligas de ferro e silício, sendo usualmente aplicada em betões de elevado desempenho tanto a nível de resistência mecânica, como a nível de durabilidade (Gomes et al. 2013).

A dimensão das suas partículas apresenta diâmetros muito reduzidos, variando em média entre 0,1µm e 0,5µm, ou seja, cerca de duas ordens de grandeza inferiores às partículas de cimento Portland (Shi et al. 2012). A reduzida dimensão das suas partículas, associada à elevada reatividade da sílica na forma vítrea, fazem com que este tipo de adição estabeleça reações pozolânicas a velocidade elevada com a pasta de cimento (Gomes et al. 2013).

Em termos de resistência à compressão, diversos autores reportaram melhorias neste parâmetro com a introdução de sílica de fumo no betão, mesmo para idades jovens (Cong et al. 1989, Demirbogal et al. 2001, Kilic et al. 2003, Bertolini et al. 2004). Para além da sua elevada reatividade, isto resulta da reduzida dimensão das partículas de sílica de fumo, que permite a ocupação dos espaços vazios não preenchidos pelas partículas de cimento e leva a um consequente aumento da compacidade do betão (Mo, et al. 2017). O refinamento das zonas de interface agregado-pasta é apontado como uma das principais vantagens na utilização de sílica de fumo, reduzindo assim o “efeito de parede” e melhorando a resistência da ligação (Neville 1995).

Tal como para as cinzas volante, a introdução de sílica de fumo no betão contribui para o aumento da sua resistência à penetração de cloretos (Mehta e Monteiro 2006). Diversos autores reportam a descida do coeficiente de difusão, com a introdução deste tipo de adição no betão, independentemente do tempo de cura do provete (Bogas 2011, Yoo et al. 2010, Youm et al. 2016, Zhang e Gjørv 1991, Bogas e Gomes 2015, Wang et al. 2005, Hooton et al. S.d., Siddique 2011).

Wang et al. (2005) concluíram que a introdução de 10% de sílica de fumo em provetes de BEAL originou valores de D_{cl} três vezes inferiores. Berke et al. (1988) referiram que para betões com a mesma relação a/c, a introdução de sílica de fumo provoca uma redução na penetração de cloretos no betão de cerca de 50%. Yoo et al. (2010) sugerem que para ensaios realizados aos 91 e 330 dias, os coeficientes de difusão obtidos diminuem com o decréscimo da relação a/c e com o incremento da percentagem de substituição de sílica de fumo, obtendo valores dentro do intervalo 0,9~4,4 x 10⁻¹² m²/s para 20% de sílica de fumo.

De uma forma geral, a melhoria no desempenho de betões com sílica de fumo é atribuída à densificação da microestrutura do betão, que ocorre de duas formas: por processos físicos associados ao efeito de filler e nucleação e por ações químicas associadas à sua reatividade pozolânica.

Porém, a capacidade de fixação em betões com sílica de fumo tende a diminuir (Arya et al. 1990, Page e Vennesland 1983). Isto acontece porque a sílica de fumo provoca uma diminuição da

alcalinidade da solução dos poros devido às reações pozolânicas (aumentando a solubilidade do sal de "Friedel") e porque reduz as fases de aluminatos capazes de fixar quimicamente os cloretos (Page e Vennesland 1983).

Relativamente ao teor crítico de cloretos, a adição de sílica de fumo parece contribuir também para a sua diminuição (Neville 1995, Manera et al. 2008, Pettersson 1995). O fenómeno pode ser explicado pela diminuição do pH na solução dos poros e diminuição na capacidade de fixação verificada neste tipo de betão.

O filler calcário é constituído essencialmente por carbonato de cálcio (CaCO_3) finamente moído, apresentando dimensões semelhantes às partículas de cimento (Li, et al. 2018). O seu uso tornou-se comum devido a alguns estudos que indicavam que em betões com baixas relações a/l, parte das partículas de cimento não concluíam o processo de hidratação, por falta de água suficiente para desenvolvimento de produtos de hidratação. A substituição de cimento por elementos mais económicos, como o filler calcário, começou assim a ser uma realidade (Bonavetti et al. 2003) e hoje em dia é bastante comum a sua aplicação em cimentos correntes.

Tal como o nome indica, este tipo de adição tem como principal função o preenchimento dos espaços vazios, aumentando assim a compacidade da mistura (Gomes et al. 2013). O seu impacto é essencialmente físico, sendo que as ações químicas são de menor relevância, uma vez que o CaCO_3 não possui propriedades hidráulicas.

De uma forma geral, a introdução de filler calcário conduz a betões mais trabalháveis, com menor exsudação, menor permeabilidade e maior velocidade de hidratação do cimento (Gomes et al. 2013, Li et al. 2018).

Relativamente à penetração de cloretos no betão, diversos autores reportam um aumento do coeficiente de difusão com a introdução de filler calcário no betão (Boubitsas s. d., Lollini et al. 2013, Hornain et al. 1995, Ghrici et al. 2007). Segundo Boubitsas (s.d.), o coeficiente de difusão de cloretos aumenta com o incremento da percentagem de substituição de filler calcário. Lollini et al. (2014) chegou à mesma conclusão no seu estudo, indicando que betões com adição de filler calcário apresentam claramente um pior desempenho relativamente à penetração de cloretos quando comparado com um betão sem adições. Segundo os autores, para 15% de substituição de filler calcário, o coeficiente de difusão aumentou entre 60% e 100% enquanto que para 30% de substituição de filler calcário, o valor de D_{Cl} aumentou cerca de três vezes (200%).

3. Materiais e metodologia de ensaio

3.1. Introdução

Tal como definido no Capítulo 1, de forma a levar a cabo este estudo, foi desenvolvida uma vasta campanha experimental que envolveu a produção e caracterização em termos de resistência à penetração de cloretos de diferentes tipos de betões com variados tipos de adições, agregados e relações a/c. O principal objetivo é relacionar os principais parâmetros de difusão de cloretos obtidos em ensaios acelerados de migração, com o desempenho evidenciado pelos mesmos betões em ensaios de imersão laboratoriais que procurem simular condições de exposição real.

Neste capítulo, será apresentada a campanha experimental realizada, com referência à caracterização dos materiais utilizados e procedimentos de ensaio preconizados. É feita uma breve descrição da metodologia utilizada, de acordo com o especificado na normalização, quando aplicável. A campanha experimental decorreu no Laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos do Instituto Superior Técnico.

3.2. Planeamento do trabalho experimental

Devido à extensão da campanha experimental, esta teve de ser dividida em duas fases. Na primeira fase procedeu-se à seleção e caracterização dos materiais, definição das composições, produção dos provetes de ensaio e caracterização dos betões no estado fresco.

Na segunda fase do trabalho, procedeu-se à caracterização física, mecânica e de durabilidade dos betões, tendo por base a realização de ensaios laboratoriais. Nesta fase, a resistência à penetração de cloretos foi caracterizada a partir de ensaios acelerados de migração e através de ensaios de imersão de média duração. No Quadro 3.1 resumem-se os vários ensaios laboratoriais realizados em cada fase do trabalho, referentes à caracterização dos materiais e análise dos betões no estado fresco e endurecido.

Quadro 3.1 - Ensaio aos agregados e betões

Fase do trabalho	Ensaio	Norma
Fase 1 – caracterização de agregados	Análise granulométrica	<i>NP EN 933-1 / NP EN 12620</i>
	Baridade	<i>NP EN 1097-3</i>
	Massa volúmica e absorção de água	<i>NP EN 1097-6</i>
	Índice de forma	<i>NP EN 933-4 / NP EN 12620</i>
Fase 1 – caracterização do betão no estado fresco	Abaixamento	<i>NP EN 12350-2</i>
	Massa volúmica	<i>NP EN 12350-6</i>
	Massa volúmica	<i>NP EN 12390-7</i>
Fase 2 – caracterização do betão no estado endurecido	Resistência à compressão	<i>NP EN 12390-3</i>
	Migração acelerada de cloretos	<i>LNEC E463</i>
	Imersão em solução de NaCl	<i>LNEC E390</i>

3.3. Materiais utilizados

A seleção dos materiais utilizados na produção dos betões teve em conta a necessidade de obter misturas com um espectro alargado de classes de resistência, tipos de agregado e adições minerais. Assim, é possível alargar a abrangência e validade do estudo aos betões mais correntemente utilizados na construção. Nos pontos que se seguem, é feita a caracterização das propriedades dos diversos materiais utilizados na produção dos betões analisados, nomeadamente cimento, agregados, adições e adjuvante. É de notar que em todos os betões produzidos utilizou-se água corrente da rede pública.

3.3.1. Cimento

No presente estudo foi utilizado cimento tipo I 42,5R, gentilmente fornecido pela empresa Secil de Outão, em Setúbal. No Quadro 3.2 e Anexo A resumem-se as principais propriedades físicas, químicas e mecânicas do cimento utilizado na produção dos betões. Os ensaios de caracterização do cimento foram efetuados e fornecidos pela empresa Secil.

Quadro 3.2 - Características físicas do cimento

Parâmetro	Cimento I 42,5 R	
Massa volúmica (g/cm ³)	3,08	
Superfície específica (cm ² /g)	4388	
Resistência à compressão (MPa)	2 dias	28,6
	7 dias	40,8
	28 dias	52,1
Perda ao rubro (%)	3,64	
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	18,49 + 4,95 + 3,61	
CaO + MgO (%)	63,11 + 1,62	

O fornecimento do cimento foi realizado ao abrigo do protocolo estabelecido entre a empresa e o Instituto Superior Técnico. Este cimento é constituído por um teor de clínquer mínimo de 95%, sendo que os restantes 0 a 5% correspondem a constituintes minoritários.

3.3.2. Adições

De acordo com a NP EN 206-1 (2007), as adições inorgânicas são classificadas em dois tipos: quase inertes (Tipo I); pozolânicas ou hidráulicas latentes (Tipo II). Neste estudo foram utilizadas duas adições do tipo II, sílica de fumo e cinza volante e uma adição do tipo I, filler calcário. A escolha destas adições deveu-se ao facto de serem as usualmente comercializadas para a produção de betão em Portugal.

3.3.2.1. Sílica de fumo

A sílica de fumo (SF) é um subproduto obtido durante a produção de silício e ligas ferro-silicidas, sendo constituída maioritariamente por sílica (SiO₂- dióxido de silício). As principais propriedades da sílica de fumo, fornecida pela empresa BASF, utilizada ao longo da campanha experimental

encontram-se resumidas no Quadro 3.3. De notar que o valor da superfície específica obtido para a sílica de fumo, é especialmente baixo. Isto deve-se ao facto de esta ter sido fornecida na forma aglomerada.

3.3.2.2. Cinza volante

As cinzas volantes (Cz) são materiais finos e leves, gerados a partir da combustão de carvão mineral em centrais termoelétricas. A sua constituição varia consoante o tipo de carvão, mas os seus principais constituintes são a sílica (SiO_2) (com 60 a 90% desta na forma vítrea), a Alumina (Al_2O_3) e o Óxido de Ferro (Fe_2O_3).

As cinzas utilizadas foram produzidas na central termoelétrica do Pego, tendo sido gentilmente cedidas ao IST pela empresa PEGOP. No Quadro 3.3 indicam-se as principais propriedades das cinzas utilizadas, que tal como as restantes cinzas produzidas em Portugal, são do tipo V (EN 197-1, 2012), isto é, maioritariamente compostas por alumina e sílica reativa.

3.3.2.3. Filler calcário

De acordo com a norma EN 197-1, o filler calcário (FC) deve ser composto por pelo menos 75% de CaCO_3 e possuir um total de carbono orgânico inferior a 0,5%. Para o presente estudo foi utilizado filler calcário gentilmente fornecido pela empresa Secil, e cujas principais características apresentam-se no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 - Características físicas das adições

Parâmetro	Sílica de fumo (SF)	Cinza volante (Cz)	Filler calcário (FC)
Massa volúmica (g/cm ³)	2,21	2,32	2,69
Superfície específica (cm ² /g)	2730	3320	7430
Perda ao rubro (%)	2,68	5,80	40,68
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	94,31 + ND + 0,03	50,16 + 25,62 + 7,14	5,05 + 1,34 + 0,82
CaO + MgO (%)	4,29 + 0,91	2,13 + 0,41	50,89 + 0,57

3.3.3. Adjuvantes

Segundo a NP EN 206-1 (2007) os adjuvantes são definidos como “material adicionado, durante o processo de mistura do betão, em pequenas quantidades em relação à massa de cimento, para modificar as propriedades do betão fresco ou endurecido”, sendo que estes estão limitados a um valor máximo de 5% em massa de cimento.

Com a chegada dos adjuvantes, em particular dos redutores de água de elevada gama ou superplastificantes (SP) foi possível a produção de betões com elevada resistência mecânica. Para este estudo foi utilizado um superplastificante de base policarboxílica, cujas propriedades se encontram no Anexo B. Este tipo de adjuvante tem a capacidade de aumentar a fluidez da mistura sem recorrer ao uso excessivo de água, permitindo também obter betões com relações a/l baixas, para idêntica trabalhabilidade.

3.3.4. Agregados

Na produção dos betões foram utilizados diversos tipos de agregados, com diferentes propriedades físicas. Relativamente aos agregados de massa volúmica normal foram considerados dois tipos de areia de natureza siliciosa (areia fina e areia grossa) e três tipos de agregado britados de origem calcária (bago de arroz, brita 1 e brita 2) (Figura 3.1). A utilização de três tipos de agregado grosso permite uma melhor reprodução de betões correntes de adequada compactidade.

Quanto aos agregados leves (massa volúmica igual ou inferior a 2000 kg/m^3 , segundo EN 13055-1 (2005)), foram utilizados dois tipos: agregado leve de argila expandida de origem nacional, comercialmente designado por Leca (Figura 3.2); agregado leve de ardósia expandida proveniente dos EUA, comercialmente designado por Stalite (Figura 3.3). Estes dois tipos de agregados leves foram utilizados para a produção de betão estrutural de agregados leves (BEAL).

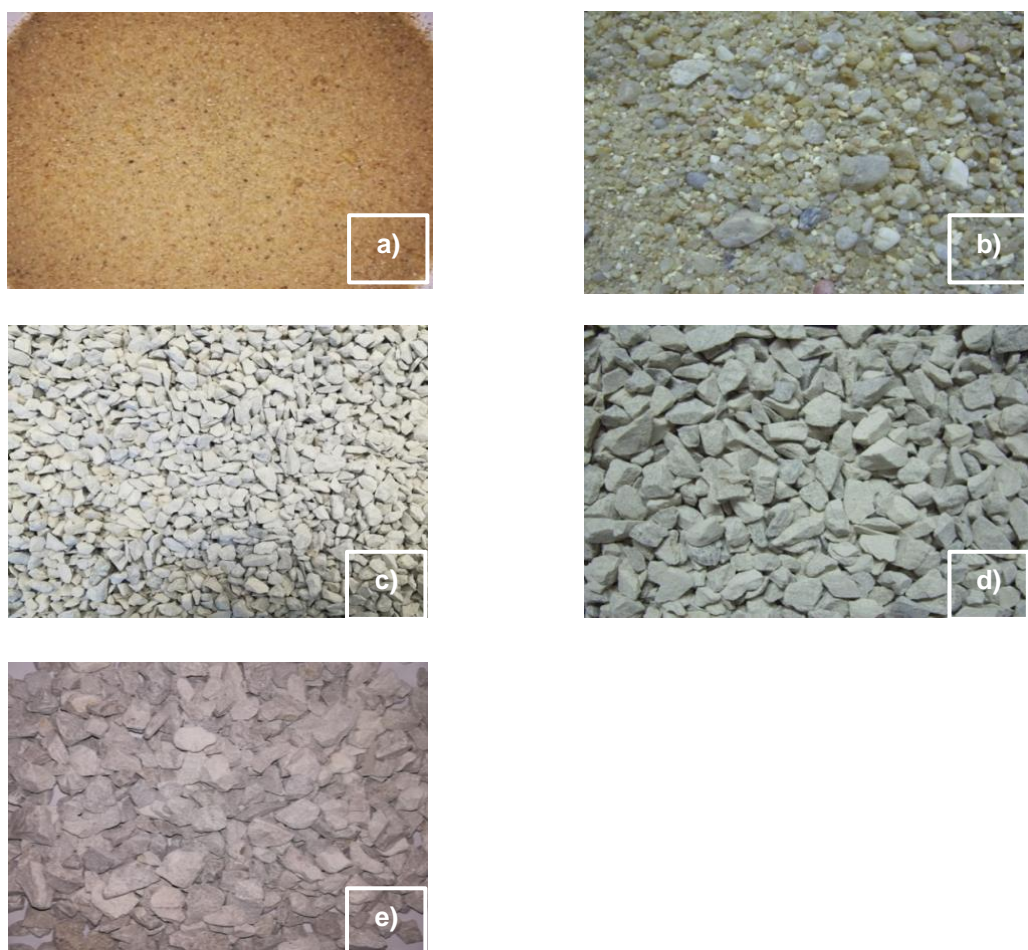


Figura 3.1 - Agregados de massa volúmica normal a) areia fina; b) areia grossa; c) bago de arroz; d) brita 1; e) brita 2

A caracterização dos agregados foi realizada tendo por base o especificado na norma NP EN 12620 (2004) para agregados de massa volúmica normal e EN 13055-1 (2005) para agregados leves. Como referido em 3.2, os agregados foram caracterizados em termos das suas principais

propriedades físicas e geométricas, tendo por base os ensaios de análise granulométrica, baridade, massa volúmica e índice de forma. Nos próximos pontos apresenta-se uma breve descrição do procedimento realizado em cada um destes ensaios, bem como os principais resultados de caracterização obtidos.



Figura 3.2 - Agregado leve de argila expandida a) aspeto das partículas; b) partícula de leca com estrutura interna porosa envolta por camada compacta de algumas dezenas de micrómetros

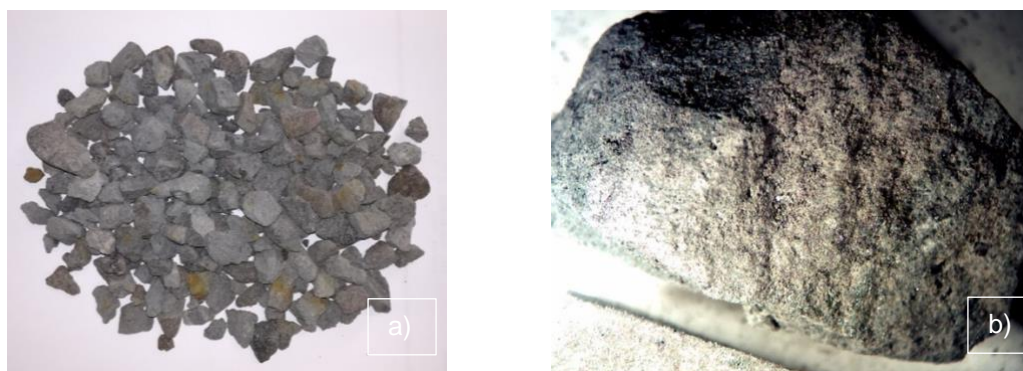


Figura 3.3 - Agregado leve de ardósia expandida a) aspeto das partículas; b) partícula de Stalite obtida por um processo de trituração

3.3.4.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada de acordo com a NP EN 933-1 (2014) e 933-2 (1999), respeitando as séries de peneiros definidas na NP EN 12620 (2004). A análise granulométrica de um agregado consiste simplesmente em separar uma amostra desse agregado em frações, cada uma contendo partículas com dimensões entre os limites correspondentes às aberturas dos peneiros superior e inferior (Neville 1995).

Para os agregados leves, as amostras foram selecionadas de modo a respeitar os limites mínimos indicados na EN 933-2 (1999), afetos de um coeficiente que tem em conta a diferença de massa volúmica face aos agregados correntes de massa volúmica normal. As curvas granulométricas de cada agregado são obtidas, calculando-se a relação entre a massa das partículas retidas nos diversos peneiros e a massa inicial. A percentagem de material retido em cada peneiro é assim obtida pela expressão Eq. (3.1), onde M_1 é a massa de amostra retida no peneiro e M_2 é a massa de amostra de agregado sujeita ao ensaio.

$$\%_{massa\ retida} = \frac{M_1}{M_2} \times 100 \quad (3.1)$$

Os resultados obtidos para cada um dos agregados está resumido no Quadro 3.4, sendo que as respectivas curvas granulométricas se encontram na Figura 3.4.

Quadro 3.4 - Granulometria dos agregados

Malha (mm)	Agregados Naturais				Agregados Leves		
	Areia Fina	Areia Grossa	Bago de Arroz	Brita 1	Brita 2	Leca	Stalite
22,4	100	100	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	97	100	100
16	100	100	100	100	76.05	100	100
12,5	100	100	100	98.61	28.3	99.66	84.83
11,2	100	100	100	92.68	13.81	97.25	62.13
10	100	100	100	82.27	5.7	92.76	46.64
8	100	99.91	99.91	48.89	1.56	76.36	18.66
6,3	100	99.39	99.62	16.84	0.62	50.35	5.18
5,6	100	98.95	94.52	6.75	0.51	35.23	2.77
4	99.99	97.04	34.05	0.87	0.43	14.15	1.03
3,35	99.96	94.69	18.02	0.52	0.33	9.67	1.03
2	99.93	82.37	3.23	0.32	0.33	2.54	0.47
1	99.36	45.83	1.3	0.3	0.33	1.55	0.4
0,5	79.78	12.59	1.12	0.3	0.33	1.23	0.37
0,25	17.76	2.91	1.12	0.3	0.33	1.19	0.32
0,125	0.31	1.12	1.12	0.3	0.13	0.85	0.27
0,063	0.03	0.86	1.12	0.3	0.03	0.49	0.2
Refugo	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0
Dmáx	1	3,35	5,60	10	20	10	12,50
dmin	0,25	0,5	3,35	6,30	11,2	4	8,00
Categoria	GF85	GF85	Gc85/20	Gc80/20	Gc85/20	Gc85/20	Gc80/20
MF	2,00	3,60	5,60	6,50	7,00	6,1	6,80

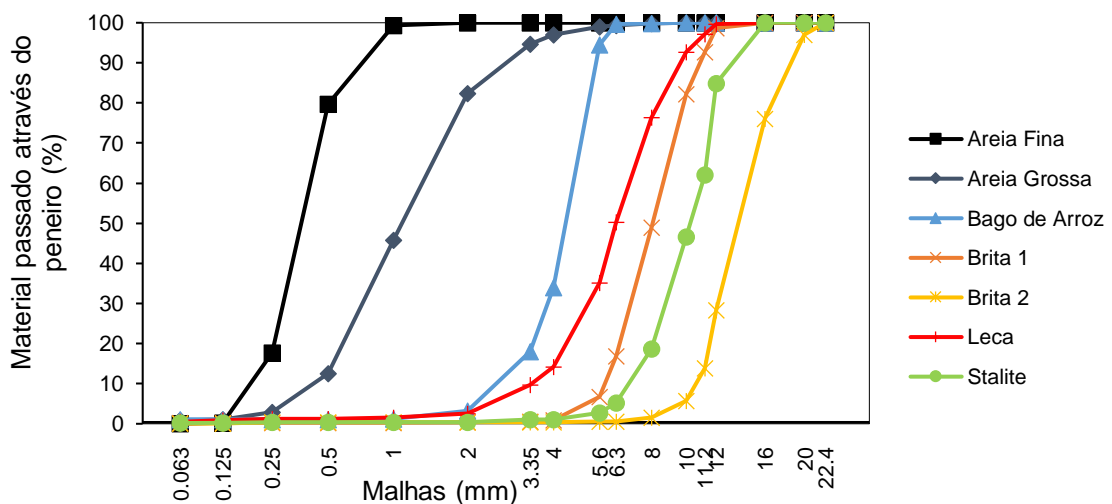


Figura 3.4 - Curva granulométrica dos agregados

Constata-se que a inclusão de dois tipos de areia, sendo uma delas de granulometria extensa (areia grossa), permite abranger misturas granulares de maior compactidade, envolvendo um espectro mais largo de dimensão de partículas.

3.3.4.2 Baridade e volume de vazios

A baridade e a estimativa da percentagem de vazios entre partículas foram determinadas de acordo com a NP EN 1097-3 (2000). O ensaio consiste na pesagem de uma amostra que ocupa um recipiente de dimensões específicas. De notar, que apenas as baridades não compactadas foram determinadas. Para a determinação da baridade, é usada a Eq.(3.2), onde b_i é a baridade de cada amostra, M_1 a massa do recipiente, M_2 a massa do conjunto “recipiente + agregado” e V o volume do recipiente:

$$b_i = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (3.2)$$

Conhecendo a baridade do agregado, é possível determinar a percentagem média de vazios, v_b , entre partículas usando a Eq.(3.3), onde ρ_{ps} é a massa volúmica das partículas secas em estufa e ρ_b a baridade.

$$v_b = \frac{\rho_{ps} - \rho_b}{\rho_{ps}} \times 100 \quad (3.3)$$

No Quadro 3.5 apresentam-se os valores da baridade e percentagem de vazios para cada agregado.

Quadro 3.5 - Características físicas dos agregados

Característica	Areias naturais siliciosas		Areias naturais calcárias			Agregados leves	
	Areia fina	Areia grossa	Bago de arroz	Brita 1	Brita 2	Leca	Stalite
Absorção de água às 24 h (%)	0,19	0,26	0,73	0,35	1,05	16,28	3,57
Massa volúmica das partículas secas em estufa (kg/m ³)	2605	2599	2646	2683	2618	969	1483
Massa volúmica do material impermeável das partículas (kg/m ³)	2618	2617	2698	2709	2693	1150	1565
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (kg/m ³)	2610	2606	2665	2693	2646	1126	1535
Baridade seca em amostra não compactada (Kg/m ³)	1569	1708	1309	1346	1325	632	760
Percentagem de vazios (%)	39,76	34,74	50,53	49,82	49,40	34,83	48,78
Índice de forma	-	-	34 (SI ₄₀)	20 (SI ₂₀)	15 (SI ₁₅)	1 (SI ₁₅)	10 (SI ₁₅)

3.3.4.3 Massa volúmica e absorção de água

A determinação da massa volúmica foi efetuada de acordo com a NP EN 1097-6 (1999). Conforme definido nesta norma, foi utilizado o método do picnómetro para determinação da massa volúmica e absorção de água das partículas. São determinados três tipos de massa volúmica, nomeadamente: massa volúmica das partículas secas em estufa, ρ_{ps} (Eq.(3.4)); massa volúmica do material impermeável das partículas, ρ_{pi} (Eq.(3.5)); massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca, $\rho_{p,sat}$, (Eq.(3.6)). Nestas equações, M_1 corresponde à massa do agregado saturado com superfície seca (g), M_2 à massa do picnómetro contendo o provete de

agregado saturado (g), M_3 à massa do picnómetro apenas cheio de água (g) e M_4 à massa do agregado seco em estufa (g).

$$\rho_{ps} = \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \times \rho_w \quad (3.4) \quad \rho_{pi} = \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \times \rho_w \quad (3.5) \quad \rho_{p,sat} = \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \times \rho_w \quad (3.6)$$

A absorção de água dos agregados foi igualmente determinada de acordo com o definido na EN 1097-6 (2003). Esta propriedade define a quantidade de água que é absorvida pelas partículas do agregado ao longo do tempo, em função da sua massa seca (NP EN 13055-1, 2005). Assim, a absorção às 24 h, abs_{24h} , pode ser obtida pela expressão Eq.(3.7):

$$abs_{24h} = \frac{M_1 - M_4}{M_4} \times 100 \quad (\%) \quad (3.7)$$

No Quadro 3.5 resumem-se os resultados referentes a esta duas propriedades.

3.3.4.4 Índice de forma

A forma dos agregados condiciona a forma como estes se arrumam e rearranjam num determinado volume, afetando a trabalhabilidade do betão no estado fresco. No presente estudo, o índice de forma foi determinado de acordo com a norma NP EN 933-4 (2002). Este ensaio consiste na classificação das partículas individuais de amostras de agregado grosso, em função da relação entre o seu comprimento (L) e a sua espessura (E). Basicamente, é determinada a massa de partículas com comprimento três vezes superior à sua espessura, sendo expresso em percentagem da massa total seca das partículas ensaiadas. No Quadro 3.5 indicam-se os valores do índice de forma obtidos para cada um dos agregados estudados.

3.4. Composição dos betões

No presente trabalho houve o cuidado de escolher as composições a serem estudadas de forma a abranger uma vasta gama de classes de resistência e massas volúmicas.

Como referido na secção 3.3.4, foram utilizados diversos tipos de agregado, tanto leves como de massa volúmica normal. Para além do tipo de agregado, procurou produzir-se misturas com diferentes relações água/ligante (0,35, 0,45 e 0,55), dosagens de cimento (350, 400 e 450 kg/m³) e tipos de ligante. De notar, que na produção de misturas com maior compacidade (relação a/l de 0,35 e 0,45) foi necessária a incorporação de superplastificante de base policarboxílica (indicado em 3.3.3), com o objetivo de ajustar a trabalhabilidade do betão.

Em relação ao tipo de ligante, foram considerados alguns dos tipos de cimentos previstos na EN 197-1 (2012), e que se consideram representativos dos mais utilizáveis a nível Nacional. Para tal, em algumas das misturas procedeu-se à substituição parcial de cimento por cinzas volantes (CV), sílica de fumo (SF) ou filler calcário (FL). Assim, de acordo com o definido na NP EN 197-1 (2012), foram produzidos betões com os seguintes ligantes: Cimento tipo CEM I 42,5R; CEM II/A-D (com 6% Sílica fumo); CEM II/A-V (15% CZ); CEM II/B-V (30% CZ); CEM II/A-L (15% FL); CEM II/B-L (30% FL). O cimento base selecionado para a produção dos cimentos compostos foi

o tipo I 42,5 R, indicado em 3.3.1. Nos Quadros 3.6, 3.7 e 3.8, resumem-se os diferentes tipos de misturas ligante e composições consideradas no trabalho.

A formulação dos betões foi feita tendo em consideração dois métodos. O método da curva de referência de Faury e o método proposto por Bogas (2011), adequado ao caso específico de betões produzidos com agregados leves. O método de Faury foi aplicado de forma a otimizar a compactidade da mistura granular a adotar na produção dos betões. Neste caso, a percentagem volumétrica de cada agregado é ajustada à curva de referência proposta por Faury, tendo em conta a geometria dos agregados utilizados e a trabalhabilidade pretendida. Para os betões leves, a dosagem de agregado leve foi corrigida de modo a garantir a adequada estabilidade das misturas no estado fresco. Conforme sugerido por Bogas (2011), o volume de agregado leve não deve exceder cerca de 400 l/m³ de betão.

Quadro 3.6 - Tipos de mistura ligante consideradas

Tipo de ligante	Cimento	Adições		
	CEM I 42,5R	Sílica de fumo	Cinzas volante	Filler Calcário
CEM I	100%	-	-	-
CEM II/A-D	94%	6%	-	-
CEM II/A-V	85%	-	15%	-
CEM II/B-V	70%	-	30%	-
CEM II/A-L	85%	-	-	15%
CEM II/B-L	70%	-	-	30%

Quadro 3.7 - Composição dos betões com agregados de massa volúmica normal

Referência Mistura	a/l	Teor de ligante (kg/m ³)	Volume de pasta (l/m ³)	Ligante	Volume de agregado grosso (l/m ³)	Volume de areia (l/m ³)		Volume de água (l/m ³)
						Fina	Grossa	
B35I				I	436	80	154	
B35IIAD				II/A-D	433	80	153	
B35IIAV	0,35	450	330	II/A-V	431	80	152	157,5
B35IIBV				II/B-V	419	72	164	
B35IIAL				II/A-L	427	87	153	
B35IIBL				II/B-L	424	80	159	
B45I				I	412	106	146	
B45IIAD				II/A-D	411	106	146	
B45IIAV	0,45	400	335	II/A-V	408	105	145	180
B45IIBV				II/B-V	406	104	144	
B45IIAL				II/A-L	411	104	146	
B45IIBL				II/B-L	409	106	145	
B55I				I	401	114	154	
B55IIAD				II/A-D	400	113	153	
B55IIAV	0,55	350	330	II/A-V	399	106	159	192,5
B55IIBV				II/B-V	395	105	158	
B55IIAL				II/A-L	400	107	160	
B55IIBL				II/B-L	399	106	159	

Para os betões com agregados leves foram apenas consideradas misturas com cimento tipo I. De realçar que o volume de água indicado no Quadro 3.8 (relativo a betões com agregados leves) refere-se à água que é efetivamente utilizada na mistura, não contabilizando a água que é absorvida pelos agregados na pré-saturação que antecede a betonagem.

Quadro 3.8 - Composição dos betões com agregados leves

Referência Mistura	a/l	Agregado	Teor de ligante (kg/m ³)	Volume de pasta (l/m ³)	Ligante	Volume agregado grosso (l/m ³)	Volume de areia (l/m ³)		Volume de água (l/m ³)
							Fina	Grossa	
S35 L35	0,35	Stalite	450	330	CEM I	355	100	214	157,5
L35		Leca					114	201	
S45 L45	0,45	Stalite	400	335	CEM I	355	100	213	180
L45		Leca					126	186	
S55 S55	0,55	Stalite	350	330	CEM I	355	114	201	192,5
S55		Leca					134	181	

3.5. Produção do betão

A produção de betão envolveu diversas fases, nomeadamente a pesagem, betonagem, moldagem, compactação e cura.

Os betões foram produzidos no Laboratório de Construção do Instituto Superior Técnico, numa misturadora de eixo vertical com descarga de fundo e com capacidade para 70 L. Antes de se proceder à produção das misturas, a betoneira foi previamente barrada com uma argamassa composta por cimento, areia fina e água. Assim, garante-se que a perda de água e materiais finos durante a mistura é reduzida.

Devido à elevada porosidade dos agregados leves, estes são sujeitos a pré-saturação antes de se proceder à produção do betão. Para isso, os agregados são submergidos durante um período de 24 horas, seguido de secagem com toalhas absorventes, de modo a se apresentarem saturados com superfície seca. Com este procedimento garante-se que a absorção de água dos agregados, durante a produção dos betões, é pouco significativa, sendo possível controlar melhor a água da mistura e a relação a/c dos betões. O procedimento de mistura dos betões encontra-se esquematizado na Figura 3.5.

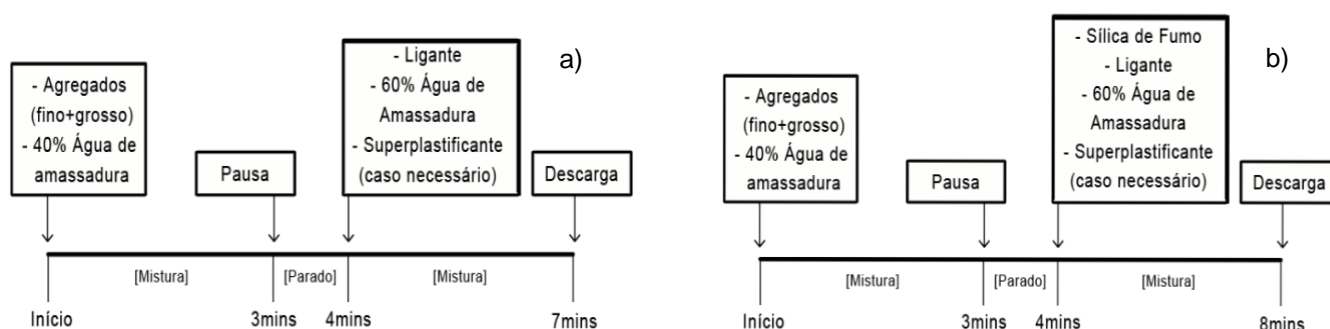


Figura 3.5 - Procedimento de mistura nos betões sem sílica de fumo (a)) e com sílica de fumo (b)) como adição

As areias naturais foram previamente secas em estufa de modo a se permitir um melhor controlo da quantidade de água efetiva nas misturas. Para tal, as areias foram secas a cerca de 200°C, até aproximadamente massa constante.

O processo de betonagem foi dividido em 3 etapas como é esquematizado na Figura 3.5. Nos betões com sílica de fumo como adição, o tempo de amassadura teve de ser incrementado devido à sua elevada superfície específica e dificuldade de dispersão. Após a betonagem, procedeu-se à caracterização dos betões no estado fresco e à moldagem dos provetes.

3.6. Moldagem, compactação e cura do betão

Para cada tipo de betão produzido, foram betonados provetes de diferente geometria, em função do ensaio a realizar. A moldagem dos provetes foi realizada em duas camadas de modo a permitir uma compactação eficiente. Para a compactação do betão foi usada uma agulha vibratória com frequência na ordem dos 9000 ciclos por minuto, tendo o procedimento cumprido o referido na NP EN 12390-2 (2000). Em geral, o tempo de vibração demorou cerca de 10 a 30s, sendo que no caso dos BEAL, o tempo de vibração foi ajustado de forma a evitar a segregação do betão. No final, foi aplicada uma película plástica no topo dos moldes de forma a evitar a retração plástica do betão. Passadas 24 horas, os provetes foram desmoldados, identificados e colocados nos ambientes de cura respetivos, consoante o ensaio a que iriam ser sujeitos. Foram utilizados três tipos de ambiente de cura:

- Câmara húmida (CH) - Câmara condicionada com humidade relativa superior a 95% e temperatura de 22±2°C
- Câmara semi-seca (CS) - Câmara condicionada com humidade relativa de 60±5% e temperatura de 22±2°C
- Laboratório (Lab) - Ambiente de laboratório a temperatura e humidade relativa variável.

No Quadro 3.9 resumem-se os diferentes tipos de provete produzidos, em função do tipo de ensaio. Resumem-se ainda os procedimentos de cura considerados em cada ensaio.

Quadro 3.9 – Ensaio realizados e dimensões dos provetes produzidos

Ensaio	Idade do ensaio	Provetes	Tipo de provete (mm)	Procedimento de cura
Resistência à compressão em cubos	28 dias	3	150*150*150	- 1 dia nos moldes em Lab (tapados)
	90 dias			- Restante do tempo em CH até idade de ensaio
Resistência à penetração de cloretos por imersão	90 dias	1	150*150*150	- 1 dia nos moldes em Lab (tapados)
				- 27 dias em CH
				- Pintura e isolamento de 5 das faces, deixando a face betonada exposta
				- Colocar em tanque com solução 15% NaCl e saturada de Ca(OH) ₂
Resistência à penetração de cloretos por método não estacionário	28 dias	3	φ100*50	- 1 dia nos moldes em Lab (tapados)
				- 6 dias em CH
				- Provetes cortados a partir do espécime moldado
				- 14 dias em CS

3.7. Ensaio de caracterização dos betões no estado fresco

Em seguida, apresenta-se a metodologia adotada no trabalho, para os ensaios de caracterização do betão no estado fresco, nomeadamente no que se refere ao ensaio de abaixamento e de determinação da massa volúmica fresca.

3.7.1. Ensaio de abaixamento do cone de Abrams

O ensaio de abaixamento é um teste realizado ao betão poucos minutos após a amassadura estar concluída e tem como objetivo fazer um controlo de qualidade ao mesmo, nomeadamente da sua consistência. Conforme referido, pretendia-se que todos os betões produzidos apresentassem uma trabalhabilidade inserida na classe de consistência S3 (abaixamento entre 100-150mm).

Este ensaio foi realizado de acordo com o preconizado na NP EN 12350-2 (2009) e consiste no preenchimento com betão fresco de um molde tronco-cónico de 30cm de altura (com aberturas nas duas extremidades), efetuado por compactação em três camadas, através de apiloamento. Em seguida, é retirado o molde verticalmente e medido o abaixamento do betão (Figura 3.6), que resulta da diferença entre o ponto mais alto da massa de betão deformada e a altura do molde utilizado (30cm neste caso). De notar que se o resultado não se situar entre os 10 e 210 mm, o ensaio deve ser considerado inválido.



Figura 3.6 - a) Equipamento para o ensaio de abaixamento e b) ensaio de abaixamento

3.7.2. Massa volúmica do betão no estado fresco

A determinação da massa volúmica no estado fresco foi realizada de acordo com a norma NP EN 12350-6 (2009). Inicialmente procede-se ao enchimento de um balde metálico com volume de 10 l, em que o betão é compactado por vibração, em duas camadas. Seguidamente, a massa volúmica é obtida através do quociente entre a massa da amostra e o volume do recipiente.

No próximo ponto, procura-se descrever o procedimento experimental adotado para a realização dos diversos ensaios de caracterização do betão no estado endurecido.

3.8. Ensaios de caracterização dos betões no estado endurecido

Numa primeira fase foram feitos ensaios laboratoriais de curta duração com vista à caracterização mecânica (resistência à compressão), física (massa volúmica) e de durabilidade (migração acelerada de cloretos). Posteriormente, foi realizado um ensaio de média duração (90 dias) com o intuito de aferir a resistência à penetração de cloretos dos vários betões estudados (ensaio de imersão) em condições representativas de ambientes de exposição real. Nos pontos em seguida referem-se os principais procedimentos seguidos em cada um destes ensaios.

3.8.1. Resistência à compressão

A resistência à compressão foi determinada segundo a norma NP EN 12390-3 (2011). Como referido em (3.6), foram utilizados provetes cúbicos com 150mm de aresta, tendo estes sido curados até à idade de ensaio em câmara condicionada com humidade relativa superior a 95%. A resistência à compressão foi determinada aos 28 e 90 dias, tendo-se ensaiado 3 provetes por cada tipo de betão. Utilizou-se uma prensa com capacidade de carga máxima de 3000 kN, adotando-se uma velocidade de 0,6 MPa/s, conforme o especificado na NP EN 12390-3 (2011).

3.8.2. Massa volúmica no estado endurecido

O ensaio de massa volúmica do betão no estado endurecido foi realizado de acordo com a NP EN 12390-7 (2009). Para tal, foram utilizados cubos de 100 mm, que foram curados continuamente na câmara húmida 27 dias após a desmoldagem, que ocorreu às 24h. Para a realização do ensaio, os provetes foram pesados ao ar (m_{ar}) e em água ($m_{água}$), sendo que a massa volúmica seca (ρ_i) é obtida pela expressão Eq.(3.8):

$$\rho_i = \frac{m_{ar}}{m_{ar} - m_{água}} \times 998 \quad (3.8)$$

3.8.3. Ensaio acelerado de migração de cloretos em regime não estacionário

O ensaio de migração de cloretos foi realizado de acordo com a especificação LNEC E463 (2004), baseado na NTbuild 492 (1999). O procedimento de cura para este ensaio encontra-se especificado em 3.6. Inicialmente foram produzidos cilindros com 250mm de altura e 100mm de diâmetro, tendo sido posteriormente cortados de modo a se obterem provetes com 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura. O seccionamento dos provetes foi efetuado após 7 dias de cura em câmara húmida. O ensaio foi executado aos 28 dias, sendo que antes foi necessário proceder ao pré-condicionamento dos provetes. Este pré-condicionamento consiste na saturação, sob vácuo, dos provetes de betão em solução de hidróxido de cálcio. Vinte e quatro horas após se ter iniciado o pré-condicionamento, os provetes ficam prontos a ser ensaiados.

Antes do ensaio, os provetes são isolados lateralmente por uma manga de borracha e as duas faces expostas são colocadas numa solução salina e numa solução de hidróxido de cálcio, respetivamente. Em seguida, com auxílio de uma fonte de alimentação com tensão de corrente ajustável (*HP-Power PS23023*), impõe-se uma diferença de potencial que vai forçar a migração de cloretos para o interior do betão. De forma a medir-se a profundidade de penetração de cloretos no betão recorreu-se a um método colorimétrico. Para tal, os provetes foram seccionados e em seguida pulverizados com uma solução de nitrato de prata, que altera de cor na presença de iões cloreto (Figura 3.7).

O coeficiente de difusão de cloretos pode ser determinado com base na expressão Eq.(3.9), onde $D_{Cl,RCMT}$ é o coeficiente de difusão em regime não estacionário, U é o valor absoluto da diferença de potencial (V), T é o valor médio da temperatura inicial e final da solução anódica (K), L é a espessura do provete (m), t é a duração do ensaio (s), x_d é o valor médio da profundidade de penetração (m) e erf^{-1} é o inverso da função erro.

$$D_{Cl,RCMT} = \frac{0,0239 \cdot (273 + T) \cdot L}{(U - 2) \cdot t} \times \left(x_d - 0,0238 \cdot \sqrt{\frac{(273 + t) \cdot L \cdot x_d}{U - 2}} \right) \left[x10^{-12} \frac{m^2}{s} \right] \quad (3.9)$$



Figura 3.7 - a) molde metálico; b) ensaio acelerado de migração de cloretos; c) método colorimétrico;

3.8.4. Ensaio de imersão em solução salina

O ensaio de imersão em solução salina seguiu o recomendado na especificação LNEC E390 (1993). Basicamente, o ensaio consiste na determinação de perfis de cloretos obtidos de provetes de betão que foram previamente submersos durante 90 dias numa solução de 15% NaCl e saturada de $Ca(OH)_2$. Esta solução foi renovada mensalmente de modo a minimizar as alterações na concentração da solução. Foi produzido um cubo de aresta de 15 cm para cada mistura de betão. Foram mantidos durante 7 dias em cura húmida, mudando-se de seguida para a câmara seca até à idade de ensaio. Todas as superfícies à exceção de uma foram impermeabilizadas com tinta apropriada, de modo a garantir que a penetração é feita de forma uniaxial, pela face betonada. Antes do ensaio, os provetes foram colocados em solução saturada de $Ca(OH)_2$, conforme prescrito na especificação LNEC E390 (1993).

Após o período de exposição foram retiradas amostras de todos os cubos a diferentes profundidades (0-2,5; 2,5-7,5; 7,5-12,5; 12,5-17,5; 17,5-22,5 e 22,5-27,5 mm de profundidade)

com recurso a uma broca de $\phi 25$ mm. Para a determinação do teor total de cloretos para cada uma das amostras recolhidas recorreu-se ao método potenciométrico. A concentração total de cloretos foi determinada de forma semelhante ao preconizado em Bogas (2011) e Real e Bogas (2018). Este procedimento baseou-se no protocolo AASHTO T260. Primeiramente, pesou-se 1,5g de amostra. Esta foi atacada por uma solução de 50 ml de água destilada e 1 mL de HNO_3 a 65%, durante 10 minutos, com agitação mecânica. Após o ataque, colocou-se 5 mL de solução tampão, de modo a elevar o valor de pH e filtrou-se a amostra. Para a medição da concentração de Cl^- presente na solução filtrada recorreu-se ao equipamento de medição *Orion Portable Meter model 290A*, conjuntamente com a célula de leitura *Combination Chloride ISE*, da empresa *EDT directION* (Figura 3.8).

Através deste método obtiveram-se os valores de concentração total de cloretos ($C_t(x)$) das amostras. Tendo em conta o teor de ligante (TL) e a massa volúmica seca de cada mistura, foi possível calcular a concentração de cloreto por massa de ligante ($C(x)$), através da Eq.(3.10):

$$C(x) = C_t(x) \times \frac{TL}{\rho_s} \quad (3.10)$$

A penetração de cloretos para o interior do betão é caracterizada pelos perfis de cloretos. Para a adequação dos perfis à curva de Fick (Eq. (3.11)) é feita uma regressão não linear, aplicando o método dos mínimos quadrados. Neste caso, a Eq.(3.11) corresponde a uma solução da segunda lei de Fick, assumindo as seguintes condições de fronteira: $c(0,t) = c_s$ e $c(x,0) = c_i$ (Poulsen e Meljbro 2006, Kropp 1995, Bogas 2011), em que se assume que a concentração inicial de cloretos no betão é desprezável ($c_i = 0\%$). Após o ajuste do perfil de cloretos à Eq. (3.11), a determinação dos parâmetros, D_{Cl} e C_s é imediata.



Figura 3.8 - a) Tanque de ensaio de imersão b) Método potenciométrico

Dada a complexidade do cálculo, optou-se por realizar a regressão não linear com recurso ao *software* de cálculo *RStudio*. Neste caso, são introduzidos no *software* os dados obtidos experimentalmente (concentrações de cloretos, $c(x,t)$, para as diferentes profundidades, x) e o período de ensaio, t (0.25 anos, que equivale a 90 dias). De uma forma geral o coeficiente de determinação, R^2 , foi igual ou superior a 0,95, mostrando que o ajustamento da curva teórica, dada pela equação (3.11), aos dados obtidos experimentalmente, se fez de forma bastante satisfatória.

$$c(x, t) = c_i + (c_s - c_i) \times \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{cl} \cdot t}} \right) \right] \quad (3.11)$$

Tal como indicado em 2.5.6, no ensaio de imersão é comum calcular-se o coeficiente de penetração, K_{Cr} , de acordo com a equação (3.12). Este coeficiente agrega os valores da concentração inicial de cloretos no betão (C_i em % massa de ligante), da concentração superficial de cloretos (C_s em % massa de ligante) e do coeficiente de difusão de cloretos (D_{Cl} em m^2/s) num único parâmetro, de maneira a fornecer uma estimativa da profundidade de penetração de uma certa concentração de cloretos crítica (C_r em % massa de ligante) ao fim de um determinado tempo (t), assumindo que todas as condições e parâmetros se mantêm constantes ao longo do tempo. O cálculo deste parâmetro é útil pois permite a comparação direta da resistência à penetração de cloretos dos diferentes betões estudados.

$$K_{Cr} = 2 \sqrt{D_{cl}} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{c_s - c_r}{c_s - c_i} \right) \quad [\text{mm/ano}^{0.5}] \quad (3.12)$$

No presente trabalho, assumiu-se o valor de $C_r=0,05\%$ de massa de ligante (tal como sugerido pela norma NTBUILD443 (1995)) e $t = 1$ ano. Recorreu-se uma vez mais ao software de cálculo RStudio para o cálculo da inversa da função de erro (erf^{-1}).

4. Análise e discussão de resultados

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos variados ensaios realizados, durante a campanha experimental. Inicialmente procede-se à caracterização dos betões no estado fresco e à sua caracterização mecânica no estado endurecido. Posteriormente, analisa-se o desempenho dos diferentes tipos de betão em termos de resistência à penetração de cloretos, tendo em consideração ensaios acelerados de migração de cloretos e ensaios de imersão em solução salina. Finalmente, será analisada a relação obtida entre estes ensaios, para diferentes tipos de agregado, relação a/c e tipos de ligante, permitindo aferir a adequabilidade dos ensaios acelerados de migração na distinção de betões de diferente durabilidade.

4.1. Caracterização do betão no estado fresco

No Quadro C.1, do Anexo C, são apresentados os resultados referentes à caracterização dos betões no estado fresco, nomeadamente no que se refere à sua massa volúmica e abaixamento.

Conforme referido em 3.7.1, os betões foram produzidos de modo a serem enquadráveis na classe de consistência S3, a que correspondem abaixamentos entre 100mm e 150mm, de acordo com a NP EN 206-1 (2007). Como se pode constatar no Quadro C.1, exceto em algumas composições com adições e relação a/l de 0,55, os betões foram produzidos dentro da classe S3. Nos betões com a/l de 0,55, visto que estes foram produzidos sem adição de superplastificante e dado que se fixou como constante a relação a/l, foi mais difícil ajustar a trabalhabilidade. Neste caso, com a adição de cinzas volantes (B55IIAV, B55IIBV), em que se reconhece o seu contributo para o aumento de fluidez das misturas (Mo et al. 2017), foram atingidos abaixamentos mais elevados, enquadráveis na classe de consistência S4.

De facto, o tipo de adjuvante utilizado neste estudo tem a capacidade de reduzir a quantidade de água livre na amassadura, mantendo a mesma trabalhabilidade e permitindo assim alcançar betões com menor relação a/l. Como indicado no Quadro C.1, foi utilizado superplastificante em todas as misturas, à exceção daquelas com relação a/l de 0,55, em que a trabalhabilidade foi apenas controlada pela dosagem de água, que se estipulou idêntica para todas as composições.

Confirma-se que os betões com sílica fumo (CEM II/A-D) apresentam os menores valores de abaixamento, para maiores dosagens de superplastificante do que aquelas consideradas nos restantes betões de idêntica relação a/l. Isto justifica-se pelo facto da sílica fumo apresentar elevada superfície específica, o que conduz a uma maior exigência de água e, conseqüentemente, misturas menos fluidas, para uma dada relação a/l. O mesmo foi reportado por outros autores (Mo et al. 2017).

Por sua vez, a adição de cinzas volantes implicou a utilização de menores teores de superplastificante, para uma dada trabalhabilidade, ou, no caso de betões sem superplastificante (a/l=0,55), conduziu a maiores abaixamentos do que o de betões com outros tipos de ligantes. A

maior esfericidade e efeito lubrificante das partículas de cinzas, o maior volume de pasta para a mesma percentagem de substituição em massa de cimento, a menor superfície específica conforme indicado no Quadro 3.3 e o baixo teor de carbono presente nas cinzas utilizadas, são algumas das razões que justificam o aumento de trabalhabilidade atingido nestas misturas (M. Thomas 2007).

Bouzoubaa et al. (2001) concluíram no seu estudo que à medida que a percentagem de cinza que é incorporada no betão aumenta, a água requerida para atingir um certo abaixamento diminui. No presente trabalho, também é possível verificar que o teor de adjuvante tende a diminuir ou a trabalhabilidade tende a aumentar nos betões com maior percentagem de cinzas (CEM II B-V).

Nos betões com 15% de filler calcário, a trabalhabilidade atingida foi semelhante à dos betões de referência com apenas CEM I, tendo em conta dosagens idênticas de superplastificante. Para maiores percentagens de incorporação, constata-se uma maior perda de consistência, demonstrando conduzir a maiores exigências de água. Estes resultados estão de acordo com a maior superfície específica determinada para estas adições, conforme indicado no Quadro 3.3.

Relativamente aos betões com agregados leves, em geral observa-se que, o uso deste tipo de agregados conduziu a uma aparente redução dos valores de abaixamento. Isso foi válido tanto nos betões com Stalite como nos betões com Leca, a qual apresenta índices de forma bastante inferiores ao dos agregados normais (Quadro 3.5). Por este motivo, e tal como observado em vários trabalhos de outros autores, seria esperado que os betões com agregados leves, principalmente os de forma arredondada obtidos em forno rotativo, apresentassem maior trabalhabilidade (Bogas, Gomes e Pereira 2012; Bogas, Nogueira e Almeida 2014). Três motivos podem ser atribuídos aos resultados obtidos. Por um lado, os BEAL exigiram menor dosagem de superplastificante para uma dada trabalhabilidade, em especial no caso dos betões com Leca (Quadro C.1). Propositadamente, não foram adicionadas maiores dosagens de superplastificante aos BEAL, dado que estes betões são mais sensíveis a pequenas alterações na composição, podendo conduzir à perda de estabilidade das misturas (Bogas, Gomes e Pereira 2012). No entanto, mesmo nos betões com a/l de 0,55 sem superplastificante, os BEAL apresentaram trabalhabilidade ligeiramente inferior. Por outro lado, os betões foram produzidos com uma composição granular diferente da dos BAN. Conforme referido no Capítulo 3, os BAN foram produzidos com maior volume de agregado grosso e maior diâmetro de agregado para igual volume de pasta, face aos BEAL. Nesse sentido, a mistura granular dos BAN apresentava menor área superficial e, como tal, menor exigência de água para uma dada trabalhabilidade. Acrescente-se ainda que dado que a força motora do ensaio de abaixamento é a gravidade, é natural que os BEAL possam apresentar menores valores de abaixamento para uma mesma trabalhabilidade (EuroLightConR2, 1998, Bogas 2011). Segundo EuroLightConR4 (1999) e Holm e Bremner (2000), o ensaio de abaixamento do cone de Abrams tende a subestimar a trabalhabilidade dos BEAL, uma vez que estes estão sujeitos a forças de deformação menores, relativamente aos BAN.

Conforme seria esperado, a massa volúmica fresca segue as mesmas tendências observadas para a massa volúmica dos betões no estado endurecido, pelo que este assunto será discutido em 4.2.

4.2. Massa volúmica no estado endurecido

Os valores obtidos para a massa volúmica, resistência à compressão e a eficiência estrutural no estado endurecido dos betões ensaiados, encontram-se resumidos no Quadro C.1 do Anexo C. Inclui-se igualmente os valores de massa volúmica no estado fresco (apresentado em 4.1) de forma a facilitar a comparação destas propriedades.

A massa volúmica dos BAN variou entre 2199 kg/m³ e 2334 kg/m³, dependendo da relação a/c e dosagem de ligante. Naturalmente, os betões com incorporação de adições de menor massa volúmica e, como tal, maior volume de pasta para uma dada percentagem de substituição em massa, apresenta menor massa volúmica. Da mesma forma, os betões de maior a/c, associados a maior porosidade, apresentam menor massa volúmica seca.

Em relação aos BEAL, os betões produzidos com Stalite apresentam valores de massa volúmica seca entre 1799 kg/m³ e 1921 kg/m³, enquadrando-se nas classes de massa volúmica D1,8-2,0, segundo a norma NP EN 206-1 (2007). Por sua vez, os BEAL produzidos com Leca apresentam valores de massa volúmica entre 1599 kg/m³ e 1659 kg/m³, enquadrando-se nas classes de massa volúmica D1.6-1.8. Assim, foi possível abranger betões de diferente classe de massa volúmica, conforme inicialmente pretendido. Face aos BAN, obtiveram-se reduções médias na massa volúmica seca de 19% e 29% com a substituição de agregados naturais por agregados leves de tipo Stalite e Leca, respetivamente.

Conforme seria de esperar, ocorreu uma redução natural da massa volúmica fresca para a massa volúmica seca. Esta redução foi mais acentuada nos BEAL com agregados de maior porosidade (Leca), visto que estes apresentavam maior teor de humidade antes da mistura. Assim, a diferença entre a massa volúmica fresca e seca dos BEAL com Leca (cerca de 13%) foi superior à de todos os outros tipos de betões (cerca de 5%). Isto deve-se à maior porosidade capilar e absorção de água associada a este tipo de agregado leve. Relativamente ao agregado leve Stalite observa-se um comportamento semelhante ao obtido para os BAN. Destaca-se o facto de o comportamento dos BEAL com Stalite ter sido semelhante ao dos BAN.

4.3. Resistência à compressão

No Quadro 4.1 são resumidos os valores médios de resistência à compressão, obtidos para os betões ensaiados. A resistência mecânica foi avaliada a 2 idades diferentes: 28 e 90 dias. Deste modo, é possível avaliar a evolução da resistência à compressão ao longo do tempo, em especial nos betões com adições. Para cada tipo de betão foram ensaiados três provetes, como indicado em 3.6, sendo que o coeficiente de variação (CV) obtido foi, em geral, inferior aos 3,2% indicados, como referência, na EN 12390-3 (2011).

Quadro 4.1 - Resultados do ensaio de resistência à compressão a 28 e 90 dias

a/l	Agregado	Ligante	Adição	$f_{cm,28d}$ (MPa)	CV (%)	$f_{cm,90d}$ (MPa)	CV (%)	$f_{c,28d}/\rho_s$ ($\times 10^3 m$)	$f_{c,90d}/\rho_s$ ($\times 10^3 m$)
0,35	Natural	CEM I	0%	76,99	1,9	79,78	2,5	3,3	3,4
		CEM II/A-D	6% SF	78,04	7,9	82,68	4,9	3,4	3,6
		CEM II/A-V	15% Cz	63,18	0,7	78,32	1,1	2,7	3,4
		CEM II/B-V	30% Cz	55,98	1,6	71,64	0,6	2,5	3,2
		CEM II/A-L	15% FC	61,98	3,6	69,82	3,2	2,7	3,0
		CEM II/B-L	30% FC	53,21	1,0	57,46	2,9	2,3	2,5
	Stalite	CEM I	0%	66,13	2,5	71,54	1,0	3,4	3,7
	Leca	CEM I	0%	35,93	2,1	38,45	5,0	2,2	2,3
0,45	Natural	CEM I	0%	58,05	5,4	62,27	3,8	2,6	2,7
		CEM II/A-D	6% SF	51,48	0,2	59,68	2,6	2,3	2,7
		CEM II/A-V	15% Cz	49,64	1,0	63,46	1,2	2,2	2,8
		CEM II/B-V	30% Cz	44,58	1,8	62,88	2,0	2,0	2,8
		CEM II/A-L	15% FC	52,31	3,4	53,32	1,0	2,3	2,4
		CEM II/B-L	30% FC	40,76	1,8	43,60	2,0	1,8	2,9
	Stalite	CEM I	0%	51,14	0,7	55,44	4,5	2,8	3,0
	Leca	CEM I	0%	30,27	3,8	34,61	2,2	1,9	2,1
0,55	Natural	CEM I	0%	47,67	1,0	53,08	0,9	2,1	2,4
		CEM II/A-D	6% SF	44,53	3,7	50,93	1,9	2,0	2,3
		CEM II/A-V	15% Cz	38,63	1,4	52,14	1,4	1,7	2,3
		CEM II/B-V	30% Cz	30,69	1,3	46,06	2,1	1,4	2,1
		CEM II/A-L	15% FC	40,76	0,9	42,39	0,7	1,8	1,9
		CEM II/B-L	30% FC	29,95	0,7	30,94	1,4	1,3	1,4
	Stalite	CEM I	0%	41,13	1,4	46,04	2,0	2,3	2,6
	Leca	CEM I	0%	26,09	2,9	29,64	2,6	1,6	1,9

A resistência à compressão aos 28 dias nos BAN varia entre 30,0 e 78,0 MPa, enquanto que para os BEAL variou entre 26,1 e 66,1 MPa, dependendo da relação a/c, tipo de ligante e tipo de agregado. Assim, os BAN produzidos enquadram-se nas classes de resistência C20/25 a C60/75, enquanto que os BEAL se enquadram nas classes de resistência LC20/22 a LC60/66, de acordo com a NP EN 206-1 (2007). Deste modo, torna-se clara a elevada abrangência de misturas produzidas, tendo sido possível cobrir as várias classes de betão correntes mais utilizados na indústria da construção.

Conforme seria expectável, a resistência à compressão foi fortemente condicionada pela relação a/l, tendendo a diminuir com o aumento deste parâmetro, para um dado tipo de ligante e agregado. No entanto, verifica-se que a variação da resistência com a relação a/c tornou-se menos relevante com a diminuição da massa volúmica do agregado. O mesmo foi constatado por outros autores (Bogas e Gomes 2013, Cortês 2014). Isso resulta da resistência destes betões

também ser condicionada pela capacidade resistente do agregado, limitando o aumento de resistência dos betões quando se melhora a qualidade da pasta. Destaca-se o facto dos betões produzidos com agregados leves menos porosos (Stalite) apresentarem resistências próximas da dos betões com agregados naturais, em especial nos betões de elevada relação a/c, para o qual a resistência limite da argamassa ainda não terá sido atingida, de acordo com o referido em Bogas et al. (2015). Para estes betões, a redução de resistência foi cerca de 12 a 16% face aos BAN de igual composição, contrastando com a redução de 44 a 53% obtida nos BEAL com Leca. Tendo em conta a redução de resistência e massa volúmica verifica-se que a eficiência estrutural (f_c/ρ_s) nestes betões foi de 2,3 a 3,7 x 10³ m nos BEAL com Stalite e 1,6 a 2,3 x 10³ m nos BEAL com Leca, quando comparado com os valores de eficiência de 1,3 a 3,6 x 10³ m nos BAN. Assim, constata-se que os BEAL com agregados de maior massa volúmica permitem a produção de betões de maior eficiência estrutural, independentemente da relação a/c.

A influência do tipo de agregado faz-se também sentir na evolução da resistência ao longo do tempo, visto que a melhoria na qualidade da pasta, conseguida com o desenvolvimento das reações de hidratação ao longo do tempo, torna-se menos importante nos betões em que a resistência mecânica é governada pelo agregado. Por esse motivo, verificam-se crescimentos menos importantes na resistência dos betões com Leca, em especial para baixas relações a/c.

No que se refere aos betões com adições, verifica-se que a substituição de cimento por 6% de sílica fumo teve uma influência pouco significativa na resistência mecânica dos betões, constatando-se inclusivamente um ligeiro decréscimo da resistência (cerca de 4% aos 90 dias e de até 11% aos 28 dias) para relações a/c superiores a 0,45. Nos betões com a/c de 0,35, obteve-se um ligeiro incremento de resistência de até 3,6%. Em face da elevada reatividade pozolânica e capacidade de filler da sílica de fumo, seriam de esperar maiores incrementos de resistência, tal como referido em trabalhos de outros autores (Yoo et al. 2016, Pun 1997). No entanto, verificou-se uma menor eficiência da SF utilizada neste trabalho, o que pode estar relacionado com as dificuldades de dispersão destas adições. Problemas semelhantes foram reportados nos trabalhos de Vieira (2003) e Bogas, Brito e Figueiredo (2015), em que os aglomerados de SF conduziram, inclusivamente, a locais de maior fragilização na matriz cimentícia.

Como referido, a eficiência da SF aumentou nos betões de menor a/c. Duas razões podem ser atribuídas a estes resultados. Por um lado, a sílica de fumo com dimensão uma ordem de grandeza inferior à do cimento poderá exercer uma maior função de refinamento em matrizes de maior compacidade (Bogas 2011, Siddique 2011, Mo et al 2017). Por outro lado, nos betões de menor a/c são utilizadas maiores dosagens de superplastificante, que deverão contribuir para uma melhor dispersão das partículas finas de SF.

Nos betões com cinzas volantes, foi notória a evolução da resistência ao longo do tempo, visto que, conforme referido, as reações pozolânicas desenvolvem-se lentamente nestas adições. Por este motivo, a substituição parcial de cimento por cinzas conduziu a uma redução significativa da resistência à compressão aos 28 dias, sendo de 14 a 19% e 23 a 36% para 15% e 30% de substituição, respetivamente. Inclusivamente, constata-se que a resistência nos betões com

cinzas foi muito semelhante à dos betões com filler calcário, confirmando a fraca reatividade pozolânica destas adições, que funcionam essencialmente por efeito de filler. De facto, por exemplo, no Quadro 4.1 verifica-se que a resistência dos betões com cinzas de relação a/l de 0,45, a que corresponde uma relação a/c de 0,53, foi semelhante à dos betões com apenas CEM I de relação a/c de 0,55, o que demonstra a fraca contribuição das cinzas volantes para a resistência mecânica.

Aos 90 dias verifica-se que a resistência mecânica não foi afetada pela incorporação de até 15% de cinzas volantes. Nos betões com 30% de cinzas, a resistência foi semelhante a ligeiramente inferior (até 13%) à dos betões de referência com apenas CEM I. Conclui-se que a redução da resistência com o aumento da percentagem de substituição de cimento por cinzas tende a diminuir com a idade de ensaio. O mesmo foi observado por outros autores (Camões 2002). O elevado desenvolvimento da resistência mecânica observado nos betões com cinzas foi independente da relação a/l, concluindo-se que a atividade pozolânica apenas começa a ter um efeito significativo entre os 28 e 90 dias.

A utilização de filler calcário conduziu às maiores reduções de resistência à compressão, independentemente da relação a/l, idade do ensaio e percentagem de substituição. A redução de resistência aumentou com a percentagem de substituição de cimento por filler calcário, atingindo-se reduções de até 42% nos betões com a/l de 0,55 e de até 30% nos betões com a/l de 0,35 e 0,45. Estas reduções foram pouco afetadas pela idade de ensaio, o que confirma a natureza pouco reativa destas adições, especialmente face aos betões com adições pozolânicas (sílica de fumo e cinzas volante). Em face dos valores obtidos, conclui-se que o filler calcário tem uma influência pouco significativa no refinamento da estrutura porosa dos betões, especialmente nos betões de maior a/c.

4.4. Ensaio acelerado de migração de cloretos, RCMT

No presente ponto são apresentados e discutidos os resultados obtidos do ensaio acelerado de migração de cloretos, RCMT (Quadro 4.2). O ensaio foi realizado aos 28 dias, tendo sido utilizado 3 provetes para cada tipo de betão. O coeficiente de variação, CV (%), é igualmente apresentado no Quadro 4.2, tendo sido inferior a 7,0%, o que está dentro dos limites sugeridos na LNEC E463 (2004), de cerca de 9%. Este valor máximo enquadra-se ainda dentro dos valores reportados por outros autores (Bogas 2011, Chlortest 2005, Cortês 2014). Nas Figuras 4.1 a 4.3, apresentam-se, sob a forma gráfica, os resultados obtidos no ensaio acelerado de migração de cloretos.

Por análise do Quadro 4.2, constata-se que foram obtidos valores de coeficiente de difusão, $D_{Cl,RCMT}$, compreendidos entre 5,95 e 25,22x 10⁻¹² m²/s, dependendo do tipo de agregado, tipo e dosagem de ligante e da relação a/l. Tendo em conta a classificação proposta por Gjørv (1996) (Anexo F - Quadro F.1), verifica-se que as misturas testadas apresentaram desde reduzida até elevada resistência à penetração de cloretos. Conclui-se assim que, o presente trabalho permite envolver betões de características muito distintas, o que aumenta a abrangência do estudo. De

notar que nenhuma das misturas ensaiadas apresenta uma resistência à penetração de cloretos muito elevada, segundo Gjrv (1996).

Conforme seria esperado, a resistência à penetração de cloretos foi fortemente afetada pela relação a/l, existindo uma clara tendência do valor de $D_{Cl,RCMT}$ aumentar com a diminuição da compacidade das misturas, independentemente do tipo de adição e tipo de agregado (Figura 4.1). Para uma relação a/l de 0,35, a maioria dos betões são classificados com uma resistência à penetração de cloretos elevada a moderada, enquanto que para uma relação a/l de 0,55, a maioria das misturas apresenta uma resistência reduzida ou muito reduzida, de acordo com a classificação proposta por Gjrv (1996). Deste modo, os resultados confirmam que a relação a/l é um dos parâmetros fundamentais na durabilidade dos betões, justificando a sua consideração nas principais metodologias prescritivas para a especificação do betão (LNEC E464 2016, NP EN 206-1 2007).

Quadro 4.2 - Resultados do ensaio acelerado de migração de cloretos

a/l	a/c	Agregado	Ligante	Adição	$D_{Cl,28d,RCMT}$ $\times 10^{-12} (m^2/s)$	CV (%)
0,35	0,35	Natural	CEM I	0%	9,97	6,2
	0,37		CEM II/A-D	6% SF	5,95	0
	0,41		CEM II/A-V	15% Cz	9,73	2,7
	0,50		CEM II/B-V	30% Cz	9,74	5,9
	0,41		CEM II/A-L	15% FC	12,03	3,7
	0,50		CEM II/B-L	30% FC	15,12	1,2
0,35	Stalite	CEM I	0%	10,61	2,0	
0,35	Leca	CEM I	0%	12,01	3,2	
0,45	0,45	Natural	CEM I	0%	14,32	8,2
	0,48		CEM II/A-D	6% SF	9,02	1,5
	0,53		CEM II/A-V	15% Cz	16,71	8,7
	0,64		CEM II/B-V	30% Cz	18,51	3,3
	0,53		CEM II/A-L	15% FC	18,69	3,1
	0,64		CEM II/B-L	30% FC	-	-
0,45	Stalite	CEM I	0%	11,82	3,1	
0,45	Leca	CEM I	0%	13,65	3,8	
0,55	0,55	Natural	CEM I	0%	16,96	3,0
	0,59		CEM II/A-D	6% SF	14,20	3,5
	0,65		CEM II/A-V	15% Cz	23,34	2,6
	0,79		CEM II/B-V	30% Cz	25,22	5,3
	0,65		CEM II/A-L	15% FC	-	-
	0,79		CEM II/B-L	30% FC	-	-
0,55	Stalite	CEM I	0%	16,26	7,0	
0,55	Leca	CEM I	0%	19,47	3,8	

Tal como explicado em 3.8.3, a obtenção dos coeficientes de difusão no ensaio RCMT é conseguido através do método colorimétrico. No presente trabalho, após a pulverização de nitrato de prata nas metades seccionadas, verificou-se que em três tipos de betão o precipitado

resultante, de cor esbranquiçada, preenchia totalmente a área pulverizada. Tal situação indica que a frente de penetração de cloretos atravessou completamente o provete ensaiado. Deste modo, tornou-se impossível a obtenção do coeficiente de difusão nestes provetes. Este fenómeno observou-se nas misturas do Quadro 4.2 onde os valores de $D_{Cl,RCMT}$ não estão indicados.

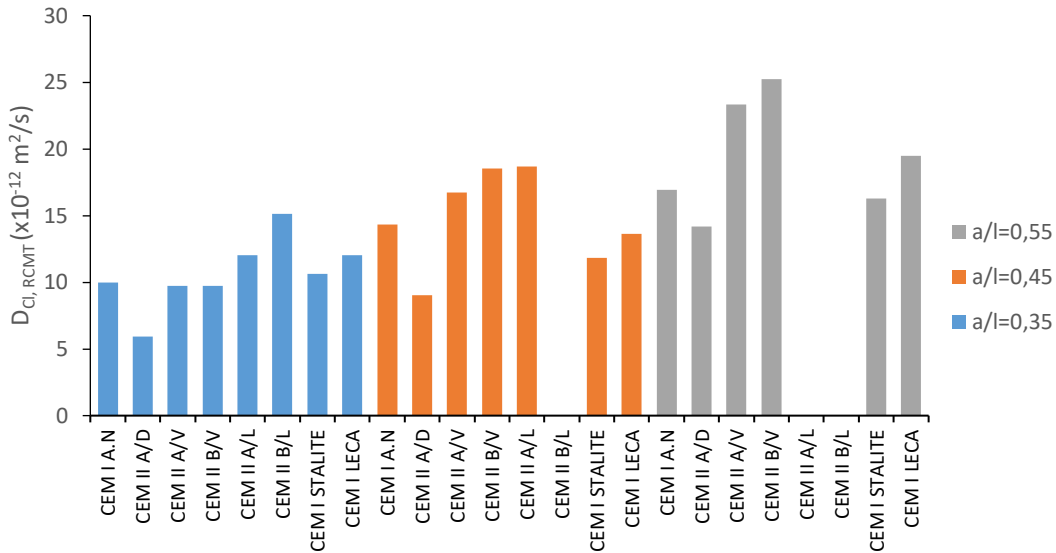


Figura 4.1 - Coeficientes de difusão de todas as misturas ensaiadas, organizadas por relação a/l

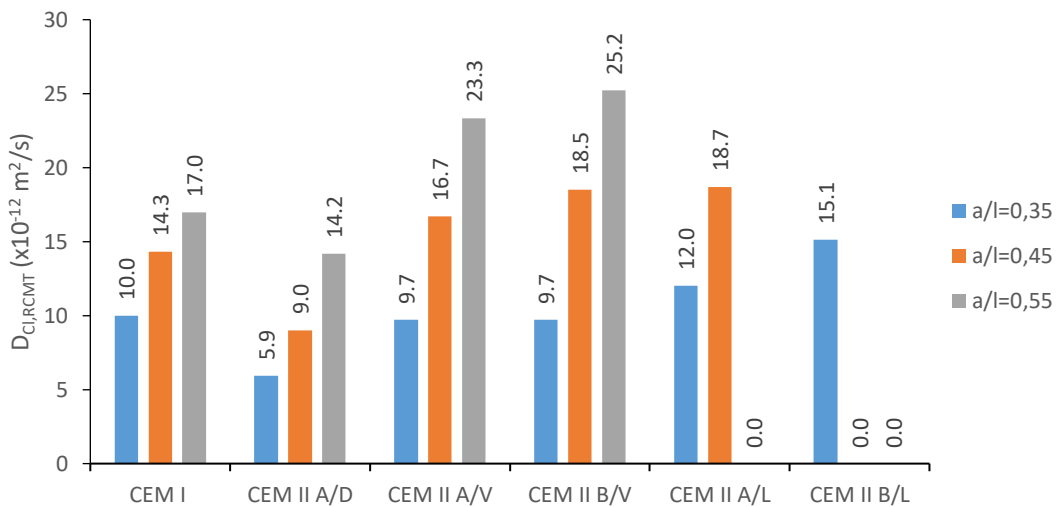


Figura 4.2 - Evolução dos coeficientes de difusão em betões produzidos com agregados naturais, para diferentes relações a/l

4.4.1. Influência do tipo de agregado

Para uma dada relação a/l, verificou-se que o valor do coeficiente de difusão não é influenciado de forma significativa pelo tipo de agregado (Figura 4.4). Conclusões semelhantes foram obtidas por outros autores (Bogas 2011, Real et al. 2015, Liu et al. 2010).

Apesar dos agregados estudados apresentarem porosidades bastante distintas, e como tal, diferentes difusibilidades, a resistência à penetração de cloretos foi pouco afetada. De acordo

com Real et al. (2015) não existe uma relação direta entre a porosidade aberta do agregado e o coeficiente de difusão, existindo outros fatores como o grau de saturação dos agregados e a densidade da sua película exterior, que devem ser tidos em conta (Real et al. 2015). De facto, vários autores sugerem que a resistência à penetração de cloretos é essencialmente condicionada pela qualidade da pasta que envolve os agregados e impede a sua maior ou menor participação no processo de difusão de cloretos no betão (Bogas e Gomes 2015, Real et al 2015, Liu et al 2010). Assim, sendo a relação a/l o principal fator a influenciar a qualidade da pasta de cimento, é também natural que esta relação tome especial importância nos resultados obtidos do ensaio RCMT.

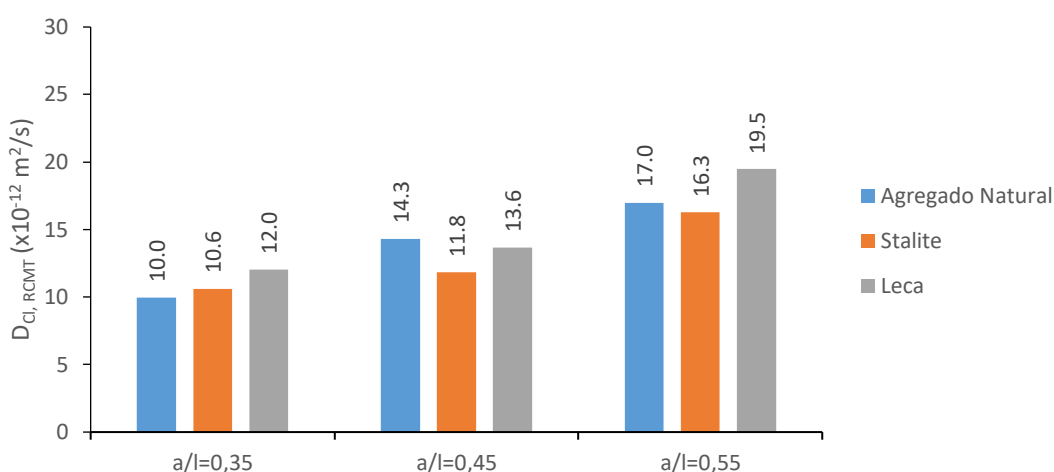


Figura 4.3 – Coeficientes de difusão em betões de CEM I, para diferentes tipos de agregado

Apesar dos resultados obtidos para os diferentes tipos de agregados serem da mesma ordem de grandeza, uma análise cuidada da Figura 4.3 e Figura 4.4 permite perceber que, exceto nos betões com a/c de 0,45, as misturas produzidas com agregados leves mais porosos (Leca), estão associadas a coeficientes de difusão ligeiramente superiores. Em média, as misturas com Leca apresentam valores de difusão cerca de 8% superiores relativamente aos obtidos para os BAN. Resultados semelhantes foram reportados por Bogas (2011).

O facto de o ensaio ser realizado a partir de provetes seccionados, implica que a presença de agregados junto da superfície facilita o mecanismo de penetração de cloretos. Neste caso, os agregados na face seccionada ficam diretamente expostos à solução de cloretos e deixam de beneficiar, tanto do efeito protetor da sua película exterior mais densa, como do efeito protetor da matriz cimentícia que envolve os agregados (Cortês 2014). Para além disso, dado que os agregados não possuem capacidade de fixação de cloretos, é natural que a difusão de cloretos através do agregado seja mais elevada do que através da matriz circundante. Assim, em especial nos ensaios que envolvem pequenas espessuras de penetração de cloretos, os BEAL com agregados mais porosos poderão apresentar menor desempenho. Porém, em ensaios que envolvem maiores espessuras de penetração e os agregados leves no interior do betão se encontrem isolados na pasta, estes fatores deverão assumir menor relevância. Neste caso, os

BEAL deverão beneficiar inclusivamente da melhor qualidade atingida na interface agregado-pasta, o que dificultará ainda mais a acessibilidade dos agregados.

Para a menor participação dos agregados leves na difusão de cloretos também será importante que a cura interna se possa desenvolver ao longo da vida dos betões, permitindo que os agregados não se encontrem saturados no interior do betão e, assim, dificultem o estabelecimento de passagens contínuas de água que favorecem o processo de difusão de cloretos. Neste trabalho, conforme referido em 3.6, os betões foram curados em câmara seca a partir dos 7 dias de idade, permitindo o desenvolvimento da cura interna.

Nos BEAL com agregados leves de menor porosidade (Stalite) foi possível verificar um desempenho semelhante a ligeiramente superior ao dos BAN de igual composição. A melhor qualidade atingida na zona de interface agregado-pasta e a não saturação destes agregados terão compensado a maior difusibilidade intrínseca deste tipo de betões face aos AN. Ao contrário do que poderia ser esperado, e tal como também documentado por Real et al. (2015) e Bogas, Brito e Cabaço (2014), não se verifica uma redução de desempenho dos BEAL face aos BAN para misturas de menor compacidade (a/c de 0,55), em que a acessibilidade do agregado poderia ser superior.

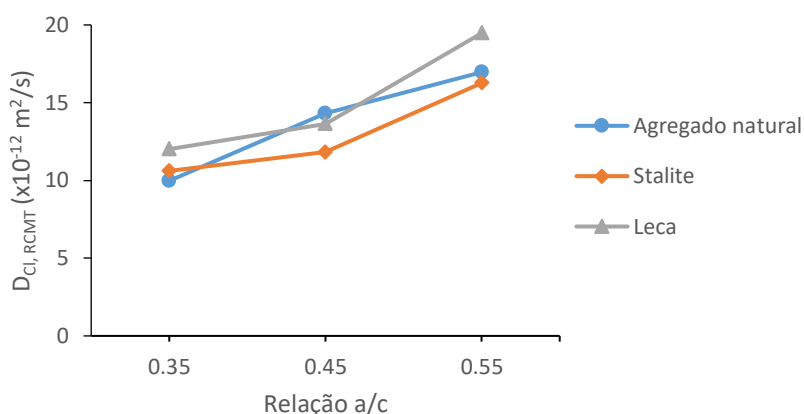


Figura 4.4 - Evolução do coeficiente de difusão com a relação a/l em betões de CEM I, com diferentes tipos de agregado

Tomando em consideração os diversos tipos de agregados utilizados em misturas com CEM I, é possível estabelecer uma relação exponencial entre o coeficiente de difusão e a relação a/c (Figura 4.5). A expressão Eq.(4.1) traduz a relação exponencial verificada entre o coeficiente de difusão e a relação a/c, independentemente do tipo de agregado.

$$D_{Cl,RCMT} = 4,61 \cdot e^{2,41 \cdot (\frac{a}{c})} \quad (4.1)$$

Na Figura 4.5, comparam-se os resultados obtidos no presente estudo com o reportado por outros autores. Real et al. (2015) e Bogas (2011) também tiveram em consideração betões com agregados de diferente massa volúmica, confirmando que a estimativa de $D_{Cl,RCMT}$ em função da relação a/l é pouco afetada pelo tipo de agregado. Destaca-se o facto destes estudos terem utilizado agregados de natureza semelhante aos considerados neste trabalho. No documento

fib34 (2006) a curva foi definida apenas tendo em consideração betões de massa volúmica normal.

Para betões de relação a/c inferior a 0,5, no presente trabalho foram obtidos coeficientes de difusão superiores aos documentados pelos restantes autores. Para relações a/c mais elevadas (a/c de 0,55), os coeficientes de difusão foram semelhantes aos obtidos no trabalho de Real et al. (2015) e ligeiramente inferiores ao sugerido nos outros dois documentos analisados. Assim, conclui-se que a tendência reportada por Real et al. (2015) foi a que melhor traduziu os resultados deste estudo. Em face dos resultados obtidos, verificou-se que ocorreu uma menor influência da relação a/c no coeficiente de difusão, a que correspondeu uma menor variação deste parâmetro em função da compacidade da matriz.

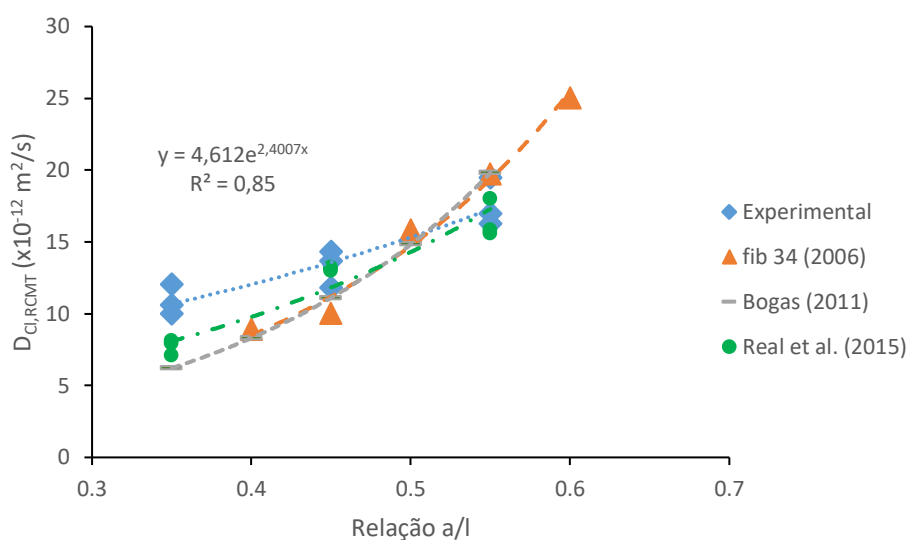


Figura 4.5 - Relação exponencial entre resultados obtidos e a relação a/c e respetiva comparação com outros autores (betões com cimentos tipo I)

4.4.2. Influência do tipo de ligante

A resistência à penetração de cloretos foi significativamente afetada pelo tipo de ligante (Quadro 4.2), permitindo, para uma dada relação a/c, a obtenção de betões desde reduzida a elevada resistência, de acordo com a classificação de Gjorv (1996) (Quadro F.1). Nas Figura 4.6 a 4.11 é ilustrado a influência da incorporação de cada um dos tipos de adição estudados no coeficiente de difusão $D_{Cl,RCMT}$. Mais uma vez, se salienta a importância da relação a/l no coeficiente de difusão, verificando-se que este tende a aumentar nos betões de menor compacidade, independentemente do tipo e dosagem de ligante.

Com exceção dos betões com sílica de fumo, o coeficiente de difusão, para uma dada relação a/l, aumentou com a percentagem de substituição de cimento por adições. Neste caso, embora não tenha sido possível determinar o coeficiente de difusão de alguns betões, conclui-se que as misturas com incorporação de filler calcário conduzem aos maiores valores de $D_{Cl,RCMT}$. Tal seria esperado, em função da fraca eficiência demonstrada por estas adições nos ensaios de resistência mecânica. Por exemplo, para betões com relação a/l de 0,35, a substituição de 15%

e 30% de cimento tipo I por filler calcário, resulta numa subida do coeficiente de difusão de 21% e 52%, respetivamente. Bogas (2011) e Boubitsas (s.d.) reportam tendências semelhantes nos seus trabalhos.

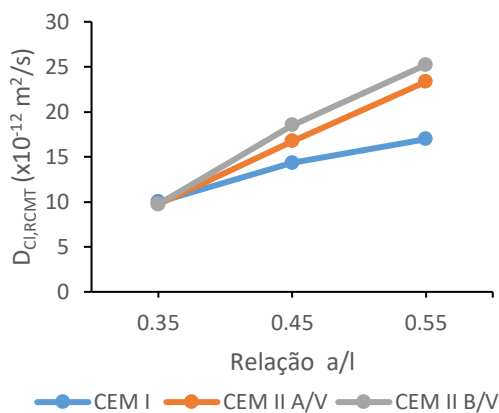


Figura 4.6 - Evolução do coeficiente de difusão para misturas com cinza volante, para diferentes relações a/l

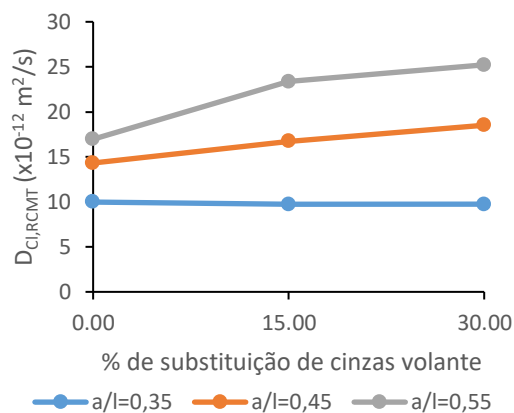


Figura 4.7 - Evolução do coeficiente de difusão para misturas com cinzas volante para diferentes % de substituição

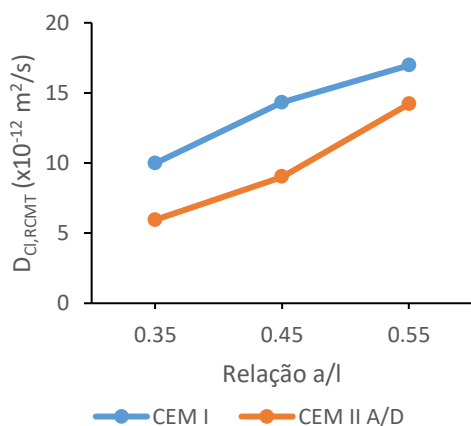


Figura 4.8 - Evolução do coeficiente de difusão para misturas com sílica de fumo, para diferentes relações a/l

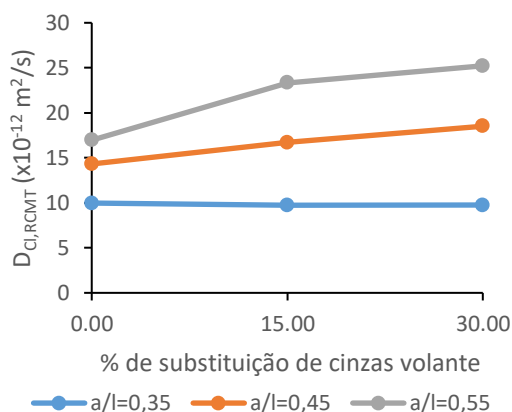


Figura 4.9 - Evolução do coeficiente de difusão para misturas com sílica de fumo, para diferentes relações a/l

O filler calcário é um tipo de adição que tem uma função essencialmente física na estrutura porosa do betão, através do preenchimento dos vazios da mistura, podendo ainda contribuir por efeito de nucleação. No entanto, a utilização de filler calcário como material de substituição, implica um decréscimo do teor de cimento e, conseqüentemente, uma redução do teor de produtos de hidratação do cimento que se formariam num betão com CEM I. Desta forma, o teor de aluminatos (C3A e C4AF) tende a decrescer, assim como a interação física e química que ocorre entre a matriz cimentícia e os iões cloreto. Assim, o eventual benefício físico proporcionado pelas partículas de filler calcário, que não foi confirmado nos ensaios de resistência mecânica (4.3), não permite contrariar os efeitos referidos e o coeficiente de difusão tende a aumentar naturalmente.

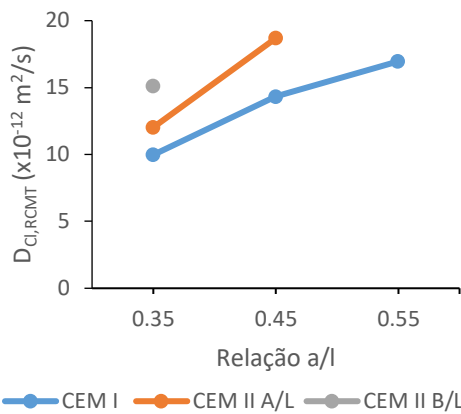


Figura 4.10 - Evolução do coeficiente de difusão para misturas com filler calcário, para diferentes relações a/l

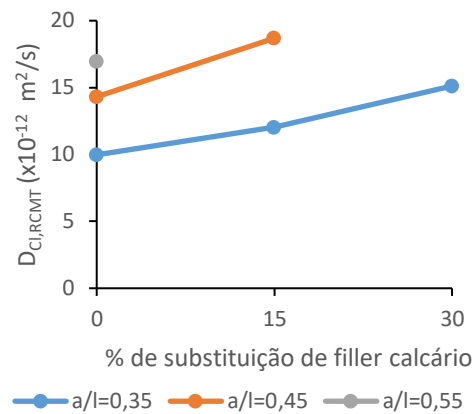


Figura 4.11 - Evolução do coeficiente de difusão para misturas com filler calcário para diferentes % de substituição

Tal como referido, as cinzas volante são um tipo de adição que se caracteriza por as suas reações pozolânicas se desenvolverem a baixa velocidade. Tendo o ensaio RCMT sido realizado aos 28 dias, é natural que as reações pozolânicas desenvolvidas não sejam suficientes para compensar o não desenvolvimento dos produtos de hidratação que resultariam do cimento tipo I que foi substituído. De facto, nos ensaios de resistência mecânica (4.3) concluiu-se que estas reações só assumiram maior relevância a partir dos 28 dias. Tendências semelhantes foram obtidas por outros autores (Demirboğa et al. 2001, Kiliç et al. 2003, Shafigh et al. 2013).

Caso ocorra o desenvolvimento das reações, a inclusão de cinzas volante no betão tende a aumentar a capacidade de fixação de cloretos, devido à maior quantidade de aluminatos e C-S-H na pasta. No entanto, mesmo que este fenómeno assumira importância, a curta duração do ensaio de migração acelerada deverá implicar reduzidas condições de fixação de cloretos (Chlortest 2005, Tang 1996). Neste caso, o ensaio deverá subestimar a real contribuição das cinzas volantes na durabilidade do betão.

Ainda assim, nos betões com a/l de 0,35, as misturas com 15% e 30% de cinzas volantes apresentaram desempenhos semelhantes ao dos betões com apenas CEM I. Neste caso, dado que aos 28 dias as reações pozolânicas ainda não se desenvolveram de forma a contribuir significativamente para a resistência à penetração de cloretos, o maior efeito das cinzas volante deverá ser físico, ocupando os espaços vazios da mistura e melhorando assim a sua compacidade. Porém, este melhoramento não foi verificado nos ensaios de resistência mecânica. Outros fatores, como a composição da solução dos poros, pode também afetar os valores obtidos nos ensaios de migração (Wee et al. 2000, Dhir e Jones 1999). Note-se que a adição de cinzas em substituição do cimento não deverá contribuir para a redução da porosidade global do betão, mas sim para o refinamento da sua microestrutura. Neste sentido, Yu e Ye (2013) verificaram que apesar das cinzas volantes conduzirem a betões de maior porosidade capilar, o raio crítico dos poros, que representa a sua conectividade, tende a diminuir. Por outras palavras, o sistema de poros é otimizado por aumento da percentagem dos pequenos poros capilares, conduzindo a uma microestrutura mais refinada. Yang (2006) confirma uma elevada

correlação linear entre o raio crítico dos poros (determinado na porosimetria de mercúrio) e o coeficiente de difusão. Como se verá em 4.5.1, a contribuição da cinza volante, nomeadamente no referido refinamento da microestrutura, será apenas relevante quando for efetivo o desenvolvimento das reações pozolânicas. Neste caso, os poros existentes na pasta de cimento, após a sua hidratação, vão ser sucessivamente preenchidos por partículas de cinzas de menores dimensões e pelos produtos resultantes da reação extra destas adições com o hidróxido de cálcio (CH) entretanto libertado nas reações de hidratação do cimento.

Por sua vez, nos betões com relações a/l de 0,45 e 0,55, os coeficientes de difusão obtidos tendem a aumentar com o aumento da percentagem de substituição de cimento por cinzas volantes. Para relações a/l mais elevadas, o efeito de filler proporcionado pelas cinzas volantes pode ser atenuado, uma vez que a estrutura porosa acaba por se tornar demasiado grosseira. Porém, de acordo com Gao et al. (2014), maiores relações a/c facilitam a hidratação mais rápida do cimento, produzindo CH e proporcionando uma ativação mais célere das cinzas volantes.

As misturas com sílica de fumo foram as que evidenciaram melhor desempenho, conduzindo a reduções significativas no coeficiente de difusão, em especial nos betões de menor a/c, onde esta foi 40% inferior à obtida nos betões com apenas CEM I. A maior contribuição da sílica de fumo nos ensaios de resistência à penetração de cloretos foi igualmente observada por outros autores (Bogas 2011, Real et al. 2015, Youm et al. 2016, Siddique 2011). Para relações a/l de 0,45 e 0,55, as reduções foram de 37% e 16%, respetivamente. A menor eficiência da sílica de fumo com o aumento da relação a/c está de acordo com os resultados obtidos para a resistência mecânica (4.3), podendo-se atribuir as mesmas razões.

De facto, dado que a sílica de fumo atua por efeito de filler e de nucleação, e através de reações pozolânicas, é natural que o seu efeito seja atenuado para relações a/l mais altas onde a estrutura porosa dos betões é mais grosseira. Por outro lado, nas misturas de menor a/c, com superplastificante, a dispersão é facilitada.

Destaca-se o facto de a substituição de cimento por sílica de fumo ter permitido subir um patamar na classificação proposta por Gjørv (1996), pelo menos nos betões com relação a/l de 0,45 e 0,55.

Por análise das Figuras 4.1 e 4.8, conclui-se que a introdução de 6% de sílica de fumo no betão foi mais eficaz do que a descida de 0,1 na sua relação a/l. Como exemplo, o coeficiente de difusão obtido para um betão CEM II A/D com relação a/l de 0,45 foi inferior ao obtido num betão CEM I com relação a/l de 0,35. O mesmo se verificou entre o betão com CEM II A/D de relação a/l 0,55 e o betão com CEM I e relação a/l de 0,45.

O bom desempenho das misturas com sílica de fumo deve-se essencialmente à sua capacidade de densificar a microestrutura do betão (Mo et al. 2017). O refinamento das zonas de interface agregado-pasta, tipicamente considerada como a fase mais “frágil” dos BAN, permite reduzir a porosidade e permeabilidade nestes locais, dificultando assim a progressão dos iões Cl⁻. Contrariamente ao que se verifica com as cinzas volante, o índice de reatividade da sílica de fumo é bastante elevado. Desta forma, o facto de o ensaio RCMT se realizar a uma idade jovem

(28 dias) acaba por não influenciar de forma tão significativa os resultados obtidos para as misturas produzidas com sílica de fumo.

Tendo em consideração o valor de a/c equivalente indicado no Quadro C.1, ou seja, sem contabilizar a contribuição das adições, na Figura 4.12 apresenta-se a variação do coeficiente de difusão em função deste parâmetro, para as diferentes misturas estudadas no presente trabalho. Por exemplo, na mistura com 30% de adições minerais e relação a/l de 0,55, o a/c equivalente seria de 0,79, a que corresponde uma mistura de elevada permeabilidade, caso as adições fossem inefetivas (Mehta e Monteiro 2006, Bertolini et al. 2004).

Na Figura 4.12 é possível fazer a análise das adições como material de adição, em vez de material de substituição. Assim, para uma dada relação a/c equivalente, verifica-se que as cinzas volantes e a sílica de fumo têm um efeito benéfico na resistência à penetração de cloretos, pois conduzem a menores valores de $D_{Cl,RCMT}$. No caso das cinzas volante, esta resistência tende a aumentar com o aumento da percentagem de adição. Conclui-se igualmente que betões com 30 % de cinzas volante apresentam um comportamento face à exposição de cloretos bastante semelhante ao dos betões com apenas 6% de sílica de fumo. Por outro lado, verifica-se que a introdução de 15% de filler calcário como material de adição não proporciona nenhum benefício, uma vez que apresenta um comportamento ligeiramente inferior aquele que foi apresentado pelos betões sem adições, especialmente para relações a/c mais elevadas. Não é possível fazer este tipo de análise para betões com 30% de calcário, pois apenas foi obtido um valor de $D_{Cl,RCMT}$, para a/l de 0,35. No entanto, o valor obtido encontra-se ao nível da curva com CEM I, indicando mais uma vez que a adição de filler não contribui para o aumento de resistência à penetração de cloretos.

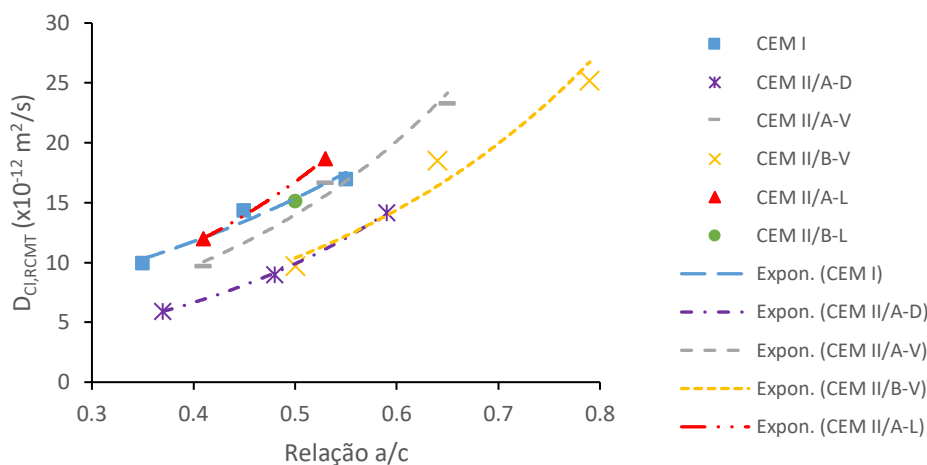


Figura 4.12 – Evolução do coeficiente de difusão em função de a/c , para diversos tipos de ligante

Ao analisar as adições como material de adição, deixa de haver a substituição de uma parte do teor de cimento. Desta forma, os materiais de adição deixam de ter que compensar a perda de produtos de hidratação que resultam da substituição do cimento. Assim, é natural que a introdução de adições propicie o refinamento da microestrutura do betão, dificultando a entrada e circulação de cloretos.

4.5. Ensaio de imersão

No Quadro 4.3 são indicados os valores médios do coeficiente de difusão e concentração superficial de cloretos para os diversos tipos de betão estudados, assim como os coeficientes de determinação, R^2 , associados ao ajuste da curva teórica aos resultados experimentais. No mesmo quadro indicam-se ainda os valores do parâmetro de penetração, K_{cr} . Nas Figuras 4.13 a 4.15 apresentam-se estes resultados sob a forma gráfica.

Quadro 4.3 - Resultados do ensaio de imersão

a/l	a/c	Agregado	Ligante	Adição	$D_{Cl,90d,im}$ $\times 10^{-12}(m^2/s)$	C_s (%mas. lig.)	K_{cr} (mm/ano ^{0,5})	R^2
0,35	0,35	Natural	CEM I	0%	2,32	2,3	15,9	0,99
	0,37		CEM II/A-D	6% SF	1,32	1,6	10,1	1,0
	0,41		CEM II/A-V	15% Cz	1,29	3,1	13,3	0,96
	0,50		CEM II/B-V	30% Cz	1,17	4,3	13,7	0,97
	0,41		CEM II/A-L	15% FC	3,67	2,3	19,9	0,97
	0,50		CEM II/B-L	30% FC	15,43	1,7	34,4	0,96
	0,35		Stalite	CEM I	0%	2,72	2,6	17,8
0,35	Leca	CEM I	0%	3,81	2,4	20,6	0,97	
0,45	0,45	Natural	CEM I	0%	4,23	2,4	21,9	1,0
	0,48		CEM II/A-D	6% SF	2,68	3,3	19,7	1,0
	0,53		CEM II/A-V	15% Cz	2,82	4,0	22,0	1,0
	0,64		CEM II/B-V	30% Cz	1,25	4,4	14,6	1,0
	0,53		CEM II/A-L	15% FC	5,47	2,4	25,5	0,88
	0,64		CEM II/B-L	30% FC	23,34	2,4	55,2	0,83
	0,45		Stalite	CEM I	0%	4,16	2,2	20,7
0,45	Leca	CEM I	0%	6,98	3,4	31,8	0,97	
0,55	0,55	Natural	CEM I	0%	4,74	3,4	27,8	0,99
	0,59		CEM II/A-D	6% SF	5,22	3,8	29,9	1,0
	0,65		CEM II/A-V	15% Cz	5,78	4,4	32,4	0,99
	0,79		CEM II/B-V	30% Cz	4,47	4,4	27,6	0,93
	0,65		CEM II/A-L	15% FC	14,29	3,5	48,0	0,97
	0,79		CEM II/B-L	30% FC	41,29	4,2	86,5	0,97
	0,55		Stalite	CEM I	0%	4,87	3,6	27,2
0,55	Leca	CEM I	0%	11,21	4,9	45,1	0,99	

Comparativamente ao ensaio RCMT, o ensaio de imersão permite uma melhor simulação da realidade, onde o fenómeno de migração é pouco comum e a difusão não é constante ao longo do tempo. Conforme detalhado em 3.8.4, após determinado período de exposição, de 90 dias no presente trabalho, foram recolhidas amostras de pó de betão a diferentes profundidades, e construídos os perfis de cloretos. A partir destes perfis, foram determinados os parâmetros $D_{Cl,im}$ e C_s por ajustamento dos mesmos à curva teórica definida pela segunda lei de Fick. Finalmente, o parâmetro de penetração, K_{cr} , foi calculado pela Equação (3.12) e procura “fundir” os dois outros parâmetros num único, de forma a facilitar a comparação direta do desempenho dos diferentes tipos de betão face à penetração de cloretos.

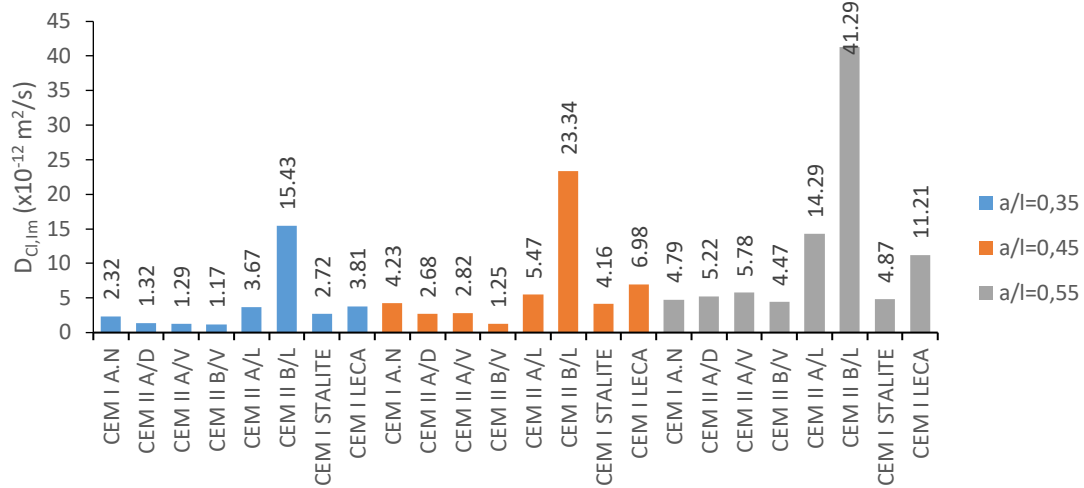


Figura 4.13 - Representação gráfica dos resultados obtidos para o coeficiente de difusão

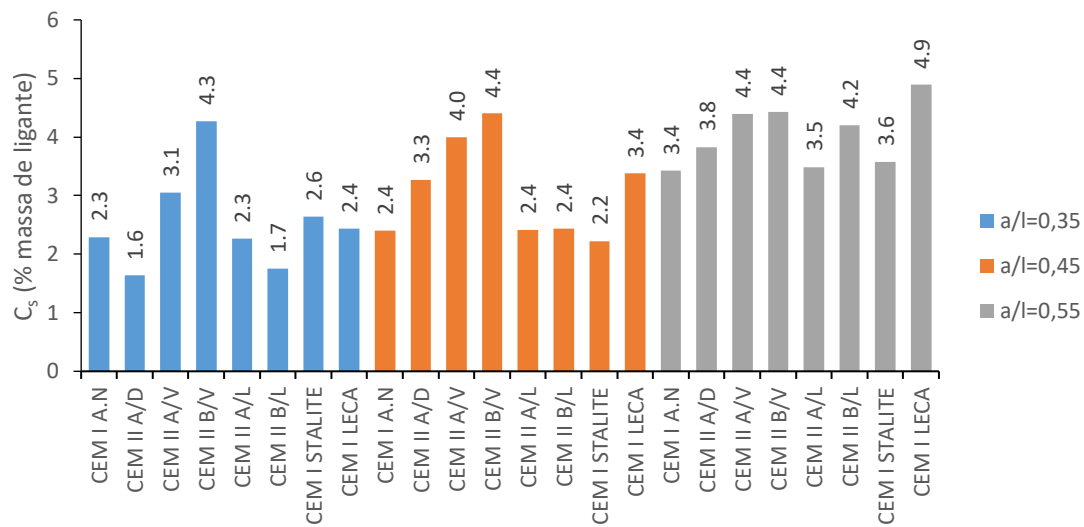


Figura 4.14 - Representação gráfica dos resultados obtidos para a concentração superficial de cloretos

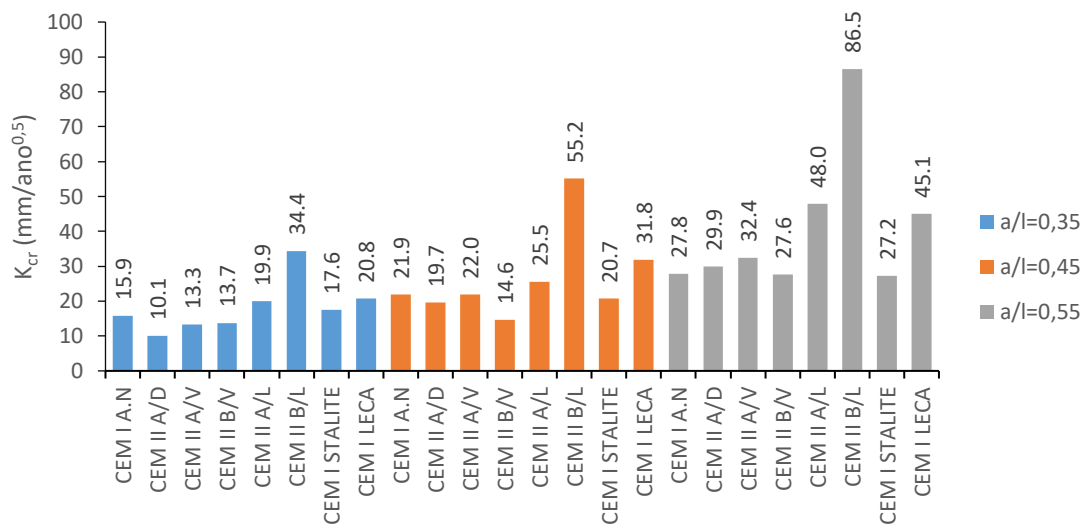


Figura 4.15 - Representação gráfica dos resultados obtidos para o parâmetro de penetração

4.5.1. Perfis de cloretos

A análise comparativa dos perfis de cloretos permite perceber a evolução da penetração deste tipo de ião ao longo da profundidade do betão. Os perfis de cloretos obtidos podem ser encontrados no Anexo E - Figura E.1 a Figura E.24.

Por vezes, no ajuste da curva teórica foi necessário ignorar alguns pontos dos perfis de cloretos. De facto, dada a variabilidade do procedimento de ensaio, houve alguns pontos do perfil de cloretos que se apresentaram afastados da tendência lógica de evolução do teor de cloretos na espessura do betão. A variabilidade existente nestes ensaios pode ser atribuída às diferentes concentrações de pasta e agregado ao longo da espessura do betão no local de recolha das amostras, bem como à variabilidade intrínseca do método de determinação do teor de cloretos nas amostras de pó de betão (Poulsen e Meljbro 2006). Este fenómeno ocorreu essencialmente para valores do perfil de cloretos a profundidades mais elevadas, onde a concentração de cloretos foi bastante baixa (e o método de determinação torna-se mais sensível).

Tal como esperado, a concentração de cloretos tende a diminuir ao longo da espessura do betão, segundo a tendência descrita pela segunda lei de Fick, independentemente da sua composição. O coeficiente de determinação, R^2 , apresentado no Quadro 4.3 diz respeito à forma como a curva teórica se ajusta aos perfis de cloretos. Como é possível observar, de uma forma geral, o valor de R^2 foi sempre superior a 0,95. Desta forma é possível afirmar que a segunda lei de Fick se ajustou de forma bastante satisfatória aos resultados obtidos experimentalmente.

Ao contrário do que poderia ser esperado em ambientes de exposição onde o mecanismo de penetração de cloretos possa ser afetado por fenómenos de absorção capilar, nos ensaios de imersão realizados, a maior concentração de cloretos ocorreu sempre junto à superfície.

Em face do curto período de exposição a que os betões foram sujeitos, a penetração de cloretos foi pouco significativa nos betões de maior compacidade (a/c de 0,35 e 0,45). Nestes casos, o teor de cloretos foi apenas significativo nos primeiros 10-20 mm de profundidade, envolvendo poucos pontos válidos para a aplicação da segunda lei de Fick. Em particular, em muitos dos betões com a/c de 0,35 não foi possível obter mais de 3 pontos com concentração de cloretos superior ao teor de cloretos inicial no betão, o que invalida uma análise rigorosa da penetração de cloretos para este caso. Desse modo, ao longo deste estudo dar-se-á maior importância aos perfis de cloretos determinados nos betões com a/c de 0,45 e 0,55. Para uma análise mais rigorosa da penetração de cloretos é necessário obter perfis para maiores tempos de exposição, conforme se pretende no âmbito do trabalho de Doutoramento em que se insere o presente estudo.

Como referido, a partir do ensaio de imersão é possível obter dois parâmetros, $D_{Cl,lm}$ e C_s , através do ajuste da curva teórica da 2ª Lei de Fick aos dados obtidos experimentalmente. No entanto, o coeficiente de difusão e a concentração superficial de cloretos não devem ser utilizados independentemente para analisar a resistência à penetração de cloretos, uma vez que os dois valores estão associados. Desta forma, o cálculo do parâmetro de penetração, através da Eq.

(3.12), permite a agregação destes dois parâmetros num único e a comparação relativa do desempenho dos diferentes tipos de betão. Neste caso, o parâmetro de penetração K_{cr} permite estimar a profundidade de penetração de uma determinada concentração crítica de cloretos (adotou-se $C_r=0,5\%$ de massa de ligante), ao fim de um determinado período de exposição (convencionou-se 1 ano), assumindo que todas as condições e parâmetros se mantêm constantes ao longo do tempo. Assim, uma vez que os valores do parâmetro de penetração obtidos são influenciados pelos valores do coeficiente de difusão e concentração superficial de cloretos, é natural que de uma forma geral, as tendências observadas na análise desses parâmetros se mantenham.

4.5.1.1. Influência da relação a/l

Analisando as Figura E.1 a Figura E.24 do Anexo E, facilmente se percebe que os perfis de cloretos obtidos variam significativamente com a relação a/l. Isso traduz-se quantitativamente pelo claro incremento do parâmetro de penetração, K_{cl} , com o aumento da relação a/l para um dado tipo de ligante (Figura 4.15). Confirma-se que a qualidade da pasta é um fator predominante na penetração de cloretos, com esta a aumentar em função da relação a/l, independentemente do tipo de agregado e tipo de ligante. Resultados semelhantes são reportados por Bogas (2011) e Real e Bogas (2018).

Nas mesmas figuras é possível verificar que a concavidade dos perfis obtidos tende a diminuir com o incremento da relação a/l. Para relações a/l baixas, a concavidade dos perfis é muito acentuada, existindo um desnível da concentração de cloretos bastante pronunciado na região junto da superfície. Por outro lado, para relações a/l mais elevadas a curva do perfil de cloretos tende a apresentar uma concavidade menos pronunciada, sendo que em alguns casos, a curva de penetração tem um desenvolvimento praticamente linear. Este aspeto realça a importância da relação a/l na capacidade de fixação e difusão de cloretos para o interior do betão. Conforme referido por Thomas e Bremner (2012), a capacidade de fixação tende a aumentar com a diminuição da relação a/l, visto que a concentração de produtos de hidratação por volume de pasta aumenta.

4.5.1.2. Influência do tipo de agregado

Para uma dada relação a/l, os betões produzidos com Leca revelaram uma menor resistência à penetração de cloretos, face aos BAN e aos BEAL com Stalite. Isso é claramente confirmado na Figura 4.16 que relaciona o parâmetro de penetração, K_{cr} , com a relação a/l, para cada tipo de agregado.

A mesma tendência foi verificada por Real et al. (2015) tendo em consideração diferentes tipos de betão expostos durante 3 anos em ambiente real de classe XS2. Este fenómeno pode ser explicado pela maior porosidade evidenciada por este tipo de agregado. Desta forma, caso os agregados se encontrem saturados, o transporte de cloretos será mais importante através destes. Ou seja, ao contrário do observado nos ensaios de migração acelerada (4.4), o coeficiente de difusão dos BEAL com Leca deverá ser superior ao dos BAN, conforme discutido

em 4.4.1. Porém, a penetração de cloretos não depende apenas do coeficiente de difusão, mas também da concentração superficial de cloretos, C_s , que conforme se discute em 4.5.3, também foi superior nos BEAL com Leca. Destaca-se o facto de a incorporação de Leca ter tido um maior impacto na penetração de cloretos do que o aumento de 0,1 na relação a/l, para os betões com a/l superior a 0,45.

Face aos BAN de igual composição, os BEAL com Leca apresentaram valores de K_{cr} 62%, 45% e 29% superiores, para relações a/l de 0,55, 0,45 e 0,35, respetivamente. Neste caso, observa-se uma maior penetrabilidade dos BEAL com Leca para maiores relações a/l, o que se pode justificar pela maior acessibilidade deste agregado quando inserido em matrizes de maior porosidade. Por outro lado, a resaturação dos agregados após imersão dos betões deverá ser mais importante para maiores relações a/l, visto que ocorre uma transição mais acentuada entre a porosidade capilar da pasta e do agregado (Real, Bogas e Pontes 2015).

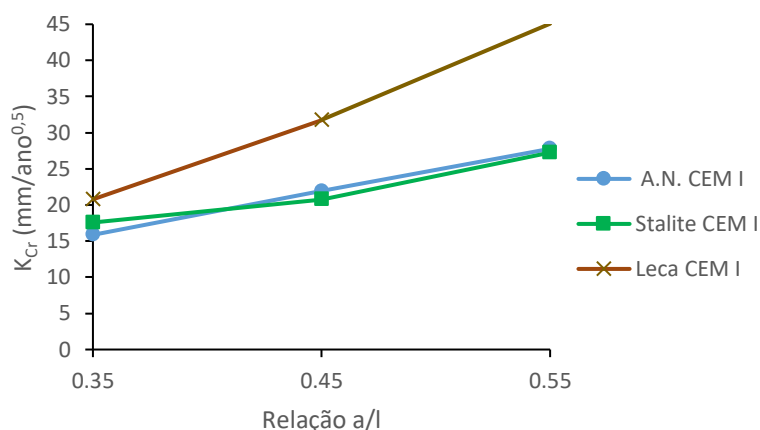


Figura 4.16 – Relação entre o parâmetro de penetração, com a relação a/l, para cada tipo de agregado

Em relação aos betões produzidos com Stalite, verifica-se que o seu comportamento foi muito semelhante ao verificado para os betões com agregados naturais. Exceto nos betões com a/c de 0,35, em que, como se referiu, os perfis de cloretos e os parâmetros D_{Cl} e C_s não foram determinados de forma rigorosa, o parâmetro K_{cr} foi semelhante a ligeiramente inferior ao dos BAN. O nível de resistência à penetração de cloretos foi de tal forma semelhante, que o perfil de cloretos obtido para cada tipo de betão tende a sobrepor-se, independentemente da relação a/l. Desta forma, confirma-se que os BEAL com agregados leves menos porosos (para $\rho_{AL} > 1300$ kg/m³) tendem a apresentar comportamentos semelhantes aos BAN (Bogas 2011, Chia e Zhang 2001, Real e Bogas 2018).

4.5.1.3. Influência do tipo de ligante

Os betões com incorporação de filler calcário apresentam o pior desempenho em termos de resistência à penetração de cloretos, corroborando o obtido nos ensaios acelerados RCMT. Tendo em consideração o parâmetro de penetração K_{cr} , verifica-se que este aumentou em função da percentagem de incorporação de filler (Figura 4.16), ocorrendo uma depreciação da resistência do betão à penetração de cloretos. Para 15% de substituição de cimento por filler

calcário, o aumento de K_{cr} foi de 25%, 16% e 72%, nos betões com a/l de 0,35, 0,45 e 0,55, respetivamente. Pode-se concluir que para relações a/l inferiores a 0,45, a resistência à penetração de cloretos é pouco afetada pela incorporação de até 15% de filler.

A maior penetração de cloretos nos betões com filler resultou do aumento verificado no seu coeficiente de difusão, visto que a concentração superficial de cloretos variou de forma pouco significativa face aos betões sem adições (4.5.3). Destaca-se o facto de se ter observado um elevado aumento do coeficiente de difusão nos betões com a/l de 0,55, o que justificou os valores elevados de K_{cr} obtidos nestas misturas com filler. Isso confirma-se pela concavidade pouco pronunciada do perfil de cloretos obtido por estes betões (Figura E.17 e Figura E.18).

A substituição de 30% de filler calcário teve um impacto significativo no aumento da penetração de cloretos no betão, independentemente da relação a/l. Conforme discutido nos ensaios de migração (4.4), o efeito de filler destas adições não é capaz de suplantar o aumento de porosidade resultante da menor formação de produtos de hidratação, que resultariam da parte de cimento que foi substituído. Assim, verifica-se que K_{cr} foi 2,2, 2,5 e 3,1 vezes superior nos betões com filler face aos betões sem adições, para relações a/l de 0,35, 0,45 e 0,55, respetivamente.

Mais uma vez, confirma-se uma pior eficiência do filler calcário nos betões de maior a/l. Tal pode ser justificado pelo facto de ocorrer uma maior percentagem de hidratação do cimento nos betões de maior a/l, fazendo-se sentir de forma mais importante a substituição de partículas de cimento, capazes de promover produtos de hidratação, por partículas de filler não reativas. Por outro lado, no caso dos betões de baixo a/l, o espaço capilar é reduzido e parte do cimento não é capaz de ser hidratado. Por outras palavras, parte do cimento anidro, não hidratável, funciona apenas como filler. Assim, neste caso, a substituição de cimento por filler assume menor impacto no desenvolvimento da resistência mecânica (conforme se verifica em 4.3) e na durabilidade do betão.

Relativamente aos betões com cinzas volante, constata-se que independentemente da percentagem de substituição e para relações a/l mais baixas (0,35 e 0,45) a penetração de cloretos tende a ser inferior (16-33%) à dos betões sem adições (Figura 4.15). Nos betões com a/c de 0,55, a resistência à penetração de cloretos foi semelhante nos dois tipos de betões.

Em geral, K_{cr} diminuiu com o aumento da percentagem de substituição de cimento por cinzas. Vários autores reportam o aumento da resistência à penetração de cloretos em betões com o aumento da incorporação de cinzas (Uysal et al. 2012, Saraswathy e Song 2007), pelo menos até uma dada percentagem de substituição (Dhir e Jones, 1999). De facto, existe um limite para a máxima dosagem de cinzas, quando a quantidade de C-H deixa de satisfazer a reação pozolânica desenvolvida pelas cinzas volantes (Nath e Sarker 2011, Camões 2002).

Neste caso, destaca-se o facto da incorporação de cinzas nos betões de maior compacidade ter promovido uma redução importante no coeficiente de difusão, mas um aumento na concentração superficial de cloretos (Quadro 4.3). Por esse motivo, o aumento na resistência à penetração de cloretos nos betões com cinzas não foi tão acentuado como poderia sugerir a elevada redução

atingida nos coeficientes de difusão. Conclui-se que comparativamente aos betões do tipo CEM I, os betões com cinza volante tendem a apresentar um comportamento menos satisfatório para baixas profundidades, invertendo-o para profundidades mais elevadas.

Ainda assim, confirma-se que em condições de ensaio de longa duração, para os quais as cinzas têm tempo de desenvolver as reações pozolânicas, a resistência à penetração de cloretos é beneficiada pela incorporação deste tipo de adições. Por outro lado, nos ensaios de longa duração, que melhor traduzem o comportamento dos betões em ambiente real, faz-se sentir de forma mais importante a maior capacidade de fixação de cloretos reportada para os betões com cinzas (Mo et al. 2017). De facto, esta maior capacidade de fixação de cloretos nos betões com cinzas permite justificar a redução do coeficiente de difusão associada ao aumento de C_s . Dado que no método volumétrico, utilizado para determinar a concentração de cloretos no presente trabalho, não é feita a distinção entre cloretos livres e combinados, as maiores concentrações de cloretos verificadas junto da superfície podem ser explicadas pelo efeito de fixação de cloretos potenciado por este tipo de adição.

O desempenho dos betões com cinzas foi inferior nos betões de maior a/l , essencialmente devido ao facto do coeficiente de difusão ter sido pouco afetado pela incorporação destas adições. Verifica-se também que em geral não houve grande influência da percentagem de incorporação de cinzas na penetração de cloretos (Figura 4.15).

Nos betões com sílica de fumo, a redução atingida no coeficiente de difusão e na concentração superficial de cloretos, para relações a/l de 0,35, fez com que estes betões apresentassem a maior resistência à penetração de cloretos entre os betões estudados (Figura 4.15 e Quadro 4.3). Neste caso, o valor de K_{cr} foi 36% inferior ao dos betões com apenas CEM I. Porém, para maiores relações a/l , o efeito da sílica de fumo no coeficiente de difusão foi progressivamente diminuindo, tornando o seu desempenho semelhante ao dos betões sem adições. Estes resultados confirmam a menor eficiência da sílica de fumo para maiores relações a/l , tal como tinha sido observado na resistência mecânica (4.3) e ensaios RCMT (4.4). A esta tendência são atribuídos os mesmos motivos referidos em 4.3 e 4.4.

Tal como estudado para o ensaio acelerado de migração de cloretos, pode ser interessante verificar o comportamento das adições utilizadas, como material de adição. Para tal, estuda-se o desempenho equivalente dos betões produzidos através do uso da relação a/c equivalente. O valor da relação a/c equivalente para cada uma das misturas, encontra-se resumido no Quadro 4.3. A evolução de K_{cr} em função da relação a/c equivalente é apresentado na Figura 4.17.

Por análise da Figura 4.17, verifica-se que a adição de filler calcário, para uma dada relação a/c , conduz a resistência à penetração de cloretos semelhantes a inferiores à dos betões com apenas CEM I. Enquanto que a adição de até 15% de filler calcário não teve influência significativa no comportamento dos betões, a adição de 30% conduziu a uma depreciação não esperada da durabilidade dos betões. Conforme discutido, os betões com 30% de filler evidenciaram um comportamento anómalo, que foi traduzido numa depreciação significativa do betão. Assim,

pode-se apenas concluir que este tipo de adição não contribuiu para melhorar a resistência dos betões à penetração de cloretos.

Relativamente aos betões com cinzas volante e sílica de fumo verifica-se que a sua utilização como material de adição melhora o desempenho do betão, sendo que este aumento é tanto maior, quanto maior a percentagem de adição. De facto, observando a Figura 4.17 verifica-se que as misturas com 30% de cinza volante são aquelas que apresentam o melhor desempenho, independentemente da relação a/c. Por outro lado, os betões com 6% de sílica de fumo e 15% de cinzas volantes tendem a apresentar um comportamento bastante semelhante.

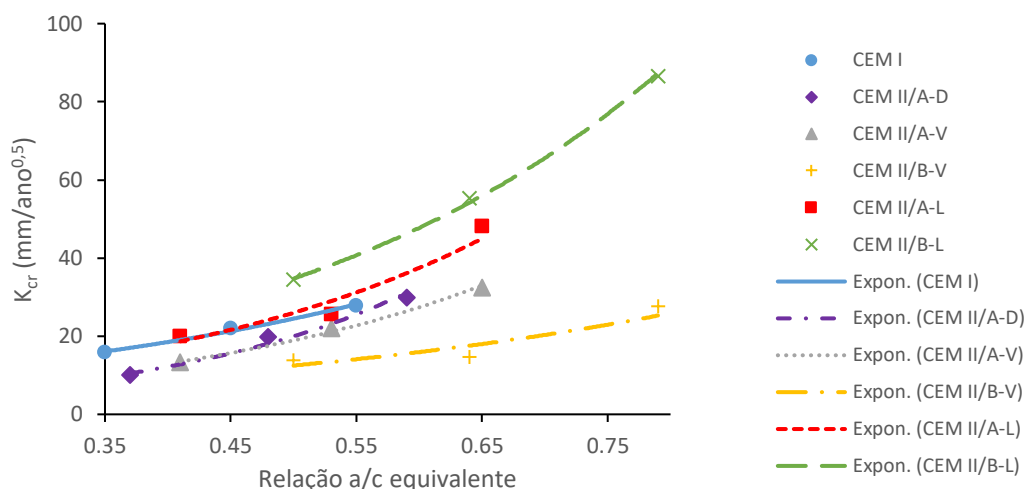


Figura 4.17 – Evolução do parâmetro de penetração em função da relação a/c, para diversos tipos de ligante

De realçar que para relações a/c mais elevadas, a curva de andamento das misturas com sílica de fumo tende a aproximar-se da curva obtida para os betões do tipo CEM I. Tal como já discutido, a sílica de fumo tem tendência a perder a sua eficiência para relações a/c mais altas. Deste modo, acaba por ser normal este maior declive apresentado pela curva associada às misturas com sílica de fumo e conseqüente decréscimo do seu desempenho com o aumento da relação a/c.

4.5.2. Coeficiente de difusão de cloretos nos ensaios de imersão, $D_{Cl,Im}$

Os coeficientes de difusão indicados no Quadro 4.3 resultam diretamente do ajuste da curva teórica da segunda lei de Fick aos resultados experimentais obtidos no ensaio de imersão. Estes coeficientes traduzem a integração do coeficiente de difusão do betão ao longo do tempo (Eq.(4.2)), visto que estes variam com o tempo de acordo com Eq.(4.3) (Poulsen e Meljbro 2006). Assim, $D_{cl}(t)$ é integrado desde o início da exposição t_i até a um dado instante t e n_{cl} é um coeficiente de idade que traduz a evolução D_{cl} no tempo.

$$D_{cl,a}(t) = \frac{\int_{t_i}^{t_i+t} D_{cl}(t') \cdot dt'}{t} \quad (4.2)$$

$$D_{cl}(t) = D_{cl,i} \cdot \left(\frac{t_i}{t}\right)^{n_{cl}} \quad (4.3)$$

Dessa forma, os coeficientes que se indicam no Quadro 4.3 são na realidade coeficientes de difusão aparentes, $D_{cl,a}$, que de certa forma traduzem um comportamento médio do betão durante o período em que este está exposto. Por outras palavras, o coeficiente real de difusão aos 90 dias é menor do que o obtido diretamente do perfil de cloretos e este por sua vez é menor do que o verificado no instante em que se iniciou a imersão em solução salina. Na Figura 4.18 são resumidos sob a forma gráfica os valores de $D_{Cl,lm}$ obtidos, estando os mesmos organizados por tipo de betão.

Analisando as Figuras 4.13, 4.17 e Quadro 4.3, verifica-se que o coeficiente de difusão aparente variou entre $1,2 \times 10^{-12}$ e $41,3 \times 10^{-12}$ m^2/s . Para períodos de exposição de 225 a 365 dias, apesar de se terem atingido composições diferentes, outros autores reportaram coeficientes de difusão da mesma ordem de grandeza (Bogas 2011, Irassar et al. 2001, Real e Bogas 2018). O menor valor de $D_{Cl,lm}$ foi obtido no betão produzido com 30% de cinzas volante e relação a/l de 0,35, enquanto que o maior valor foi verificado no betão produzido com 30% de filler calcário e relação a/l de 0,55. Real e Bogas (2018) verificaram uma tendência semelhante em betões expostos durante 3 anos em ambiente de exposição real.

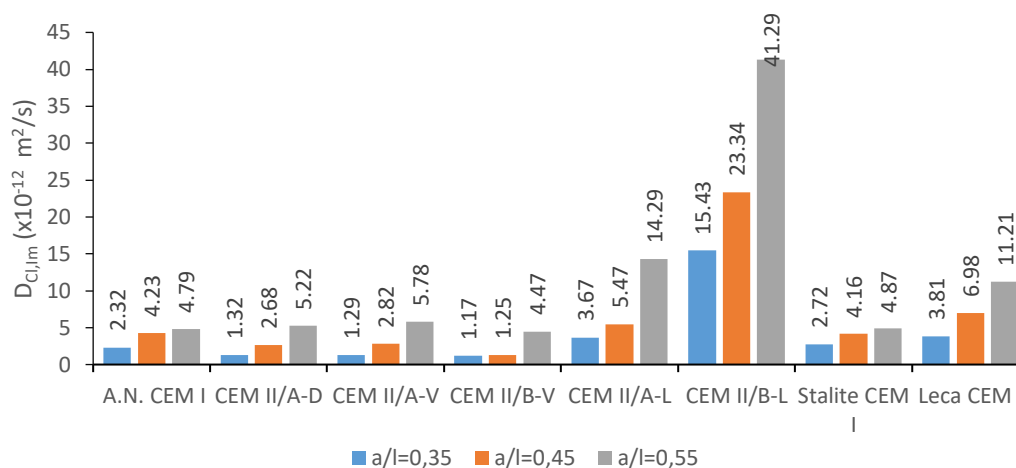


Figura 4.18 - Evolução do coeficiente de difusão em função da relação a/l, para betões com diversos tipos de ligante e agregado

4.5.2.1. Influência da relação a/l

Como esperado, os coeficientes de difusão foram afetados significativamente pela relação a/l, da mesma forma que no ensaio RCMT (Figura 4.18 e Figura 4.19). Tendo por base os resultados obtidos nos dois ensaios, conclui-se que é justificável considerar o parâmetro a/l na classificação da durabilidade dos betões, conforme é preconizado na EN 206 (2007) e E464 (2016).

Em termos médios, o aumento da relação a/l de 0,35 para 0,45 provocou um aumento de 68% nos coeficientes de difusão. Por outro lado, um aumento de a/l de 0,45 para 0,55 resultou num aumento médio de 98% nos coeficientes de difusão. Assim, confirma-se um crescimento não

linear do coeficiente de difusão com a relação a/l. Isto está de acordo com o documentado por Powers et al. (1954) em que a porosidade e a permeabilidade do betão têm um crescimento exponencial com a relação a/c.

Destaca-se o comportamento anómalo dos betões com 30% de filler quando comparado com o dos restantes betões (Figura 4.18). Embora já se estivesse à espera de maiores coeficientes de difusão nestes betões, as diferenças obtidas não são justificáveis, visto que por exemplo, os betões com CEM I e a/c de 0,55 apresentaram coeficientes de difusão 3 vezes inferiores ao do betão com CEM II/B-L e relação a/l de 0,35, a que corresponde uma relação a/c de apenas 0,5. Ou seja, algo terá ocorrido na produção destes betões que fez com que a inclusão de filler tivesse sido nefasta para a sua microestrutura. Porém, os resultados de massa volúmica (4.2), resistência mecânica (4.3) e dos ensaios RCMT (4.4) não confirmam esta hipótese, embora os provetes tenham sido obtidos de amassaduras diferentes. Em face destes resultados optou-se por não considerar os valores do betão com 30% de filler na restante análise dos resultados.

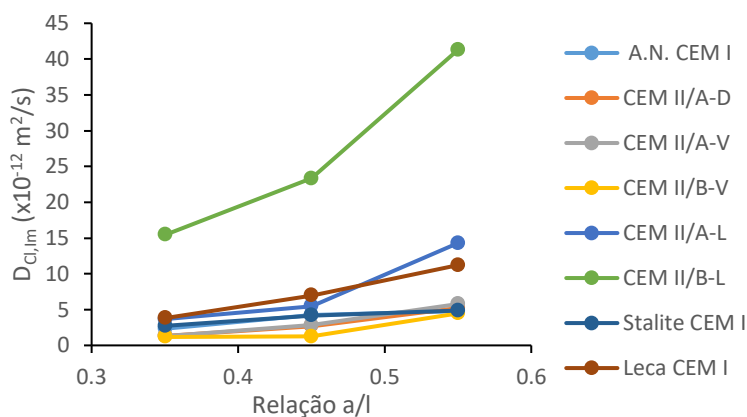


Figura 4.19 - Evolução dos coeficientes de difusão com a relação a/l

4.5.2.2. Influência do tipo de agregado

Verifica-se que os betões produzidos com Stalite apresentaram um coeficiente de difusão semelhante ao dos BAN (Figura 4.20). Exceto para os betões com a/l de 0,35 (em que pelos motivos referidos, a determinação de D_{Cl} não foi rigorosa), os coeficientes de difusão variaram menos de 2% entre betões. Esta tendência foi igualmente observada no ensaio RCMT e é confirmada por outros autores em ensaios de curta e longa duração (Bogas 2011, Real e Bogas 2018, Youm et al. 2016, Real et al. 2015).

O ligeiro acréscimo de porosidade e difusibilidade do agregado Stalite face aos agregados de massa volúmica normal terá sido compensado pela melhor qualidade da zona de interface atingida nestes betões e pela eventual não saturação dos agregados (ou estabelecimento de passagens contínuas de água). Assim, pode-se concluir que a difusão de cloretos é pouco afetada pela incorporação de agregados leves de baixa porosidade.

Por outro lado, nas misturas com Leca confirma-se a tendência observada nos ensaios de migração, em que os betões com agregados mais porosos apresentaram menores coeficientes de difusão. Analisando a Figura 4.20, verifica-se que a diferença do coeficiente de difusão dos BEAL com Leca, face aos BAN, tende a aumentar com a relação a/l. Para uma relação a/l de 0,55, o coeficiente de difusão dos BEAL com Leca chega a ser cerca de 2,36 vezes superior ao dos BAN, ao passo que para as relações a/l de 0,45 e 0,35 foi de apenas 1,65 e 1,64, respetivamente. Assim, os resultados sugerem uma maior participação do agregado leve quando este é envolvido por pastas de pior qualidade, em especial para matrizes de baixa compacidade (a/l de 0,55). O mesmo é referido por outros autores (Bogas et al 2015).

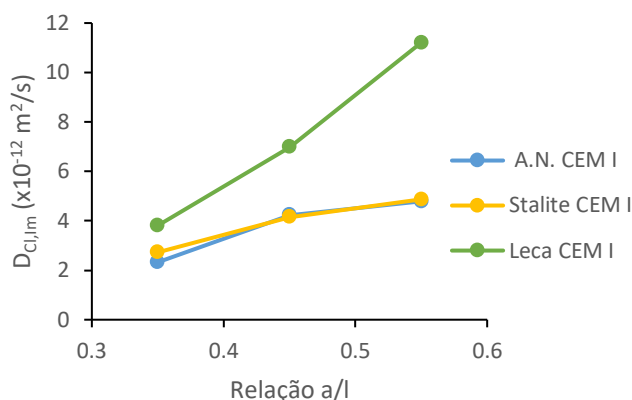


Figura 4.20 - Evolução dos coeficientes de difusão com a relação a/l, para diferentes tipos de agregado

Porém, esta tendência não foi confirmada nos ensaios acelerados de migração (4.4). Por sua vez, Bogas (2011) reporta valores de $D_{Ci,lm}$ ligeiramente inferiores nos BEAL com agregados mais porosos, em relação aos BAN, justificando-o com o facto de o ensaio de imersão implicar períodos de exposição mais longos, sendo assim possível uma progressão da cura interna dos provetes e consequente redução na permeabilidade do betão. Real e Bogas (2018), tendo em conta betões expostos durante 3 anos em ambiente marítimo, referem não existir influência significativa do tipo de agregado, no coeficiente de difusão. No entanto, verificaram que os betões com agregados leves mais porosos apresentaram um desempenho ligeiramente pior relativamente aos BAN, especialmente para a/l de 0,45.

Em geral, apenas se pode concluir que a maior porosidade do agregado, aliado à sua incapacidade de fixação de cloretos, não foi compensada por outros fatores que pudessem conduzir a um menor aumento do coeficiente de difusão, conforme sucedeu com os BEAL com Stalite. Em face dos resultados obtidos, que sugerem a participação dos agregados leves mais porosos no processo de difusão, conclui-se também, que pelo menos nos primeiros milímetros de espessura do betão, os agregados encontram-se suficientemente saturados para que se estabeleçam passagens contínuas de água. Isso é facilitado pelo facto de se tratar de betões expostos continuamente em ambiente imerso, de classe XS2.

4.5.2.3. Influência do tipo de ligante

Nas Figura 4.21 a Figura 4.23, representa-se graficamente a evolução do coeficiente de difusão em função da percentagem de substituição de cada tipo de ligante.

Em geral, constata-se que uma variação de 0,1 na relação a/l tem maior impacto na resistência à penetração de cloretos do betão, do que o tipo e dosagem de ligante (Figura 4.21 a Figura 4.23). De facto, o valor do coeficiente de difusão tende a ser superior para betões de menor compacidade, independentemente do tipo e dosagem de ligante. A exceção ocorreu para os betões com a/l de 0,45 e 30% de cinzas, em que foi possível atingir grandes reduções no coeficiente de difusão (cerca de 70%).

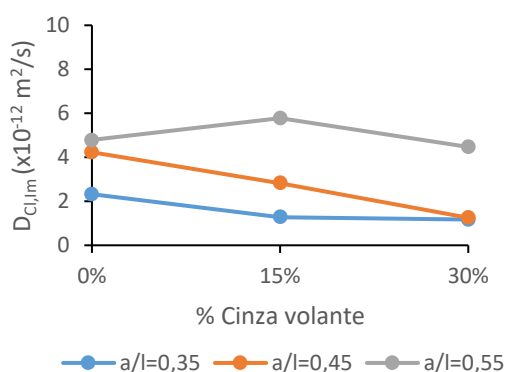


Figura 4.21 – Evolução do coeficiente de difusão com a % substituição de cinzas volantes

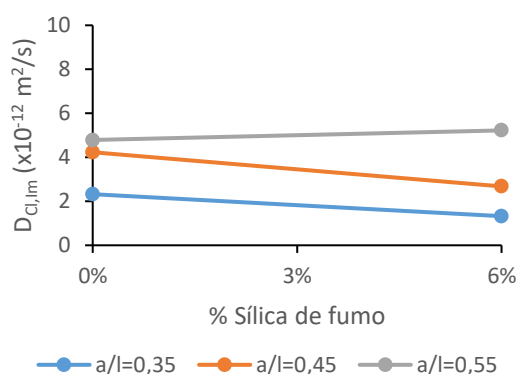


Figura 4.22 - Evolução do coeficiente de difusão com a % substituição de sílica de fumo

Constata-se ainda que, em geral, apenas para relações a/l muito elevadas ou para incorporação de filler calcário é que as adições não tiveram um efeito benéfico na resistência à penetração dos betões. Apenas nos betões com filler ocorreu uma diferença significativa da durabilidade dos betões.

Independentemente da relação a/l e do tipo e dosagem de ligante, o desempenho dos betões com filler calcário foi sempre inferior ao do betão sem adições. No presente trabalho, a incorporação de 15% de filler conduziu a valores de D_{Cl} 1,6, 1,29 e 3 vezes superiores aos dos betões com CEM I, para a/l de 0,35, 0,45 e 0,55, respetivamente.

Conforme discutido, o efeito de diluição na quantidade de produtos de hidratação, proporcionado pela substituição do cimento por filler calcário, não é compensado pelo eventual efeito de filler e nucleação destas adições. Confirma-se a redução da eficiência do filler calcário com o aumento da relação a/l , sendo atribuídos os mesmos motivos referidos em 4.5.1.3. Em betões com elevado a/l , aliado a uma elevada percentagem de substituição de cimento por filler calcário, mesmo após a hidratação completa do betão, os produtos resultantes não conseguem segmentar a estrutura porosa do betão, podendo-se verificar uma permeabilidade demasiado elevada. Para baixas percentagens de substituição (até 15%) e reduzida relação a/l ($<0,45$), o efeito causado na microestrutura é pouco significativo e o impacto gerado no aumento do coeficiente de difusão torna-se menos relevante.

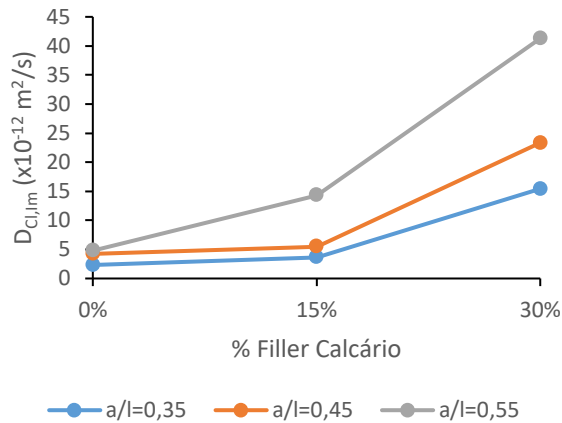


Figura 4.23 - Evolução do coeficiente de difusão com a % substituição de filler calcário

Conforme discutido, apesar de diversos autores reportarem piores resistências à penetração de cloretos nos betões com filler (Irassar et al. 2001), no presente trabalho verifica-se uma diferença bastante acentuada entre o desempenho de um betão sem adições e betões com 30% filler calcário. Para uma relação a/l de 0,55 e 30% de filler calcário, esta diferença chegou a ser de, aproximadamente, 750%. Pelos motivos também referidos em 4.5.1.3, os resultados obtidos terão sido anómalos.

Porém, valores da mesma ordem de grandeza foram reportados na literatura. Irassar et al. (2001) analisaram a resistência à penetração de cloretos de betões com 20% de filler calcário e relação a/l de 0,6, imersos durante 360 dias em solução salina. Os autores reportam coeficientes de difusão de $41,4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, que foram semelhantes ao obtido no presente trabalho para os betões com 30% de filler calcário e relação a/l de 0,55. No entanto, o aumento face aos betões com CEM I foi de apenas 61%. Note-se que o presente trabalho tem apenas em conta 90 dias de exposição, o que conduz a maiores coeficientes de difusão.

Os betões com cinzas volantes foram aqueles que conduziram a maiores reduções no coeficiente de difusão, ao contrário do que tinha observado no ensaio acelerado de migração de cloretos. Nos betões com cinzas volante foram obtidos coeficientes de difusão compreendidos entre $1,17 \times 10^{-12}$ e $5,78 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, cerca de 7 a 70% inferiores ao dos betões com apenas CEM I correspondentes. Coeficientes de difusão da mesma ordem de grandeza foram reportados por Bogas (2011), Real e Bogas (2018) e Yoo et al. (2010), tendo em conta ensaios de longa duração em ambiente real e de laboratório.

Face aos betões sem adições, a substituição de 15% de cimento por cinzas conduziu a uma redução de D_{Ci} de 44% e 33% para uma relação a/l de 0,35 e 0,45, respetivamente. Para substituições de 30% de cinzas, as reduções foram de 49% e 70%, respetivamente. Porém, nos betões com a/l de 0,55, os betões com cinzas tiveram um desempenho semelhante ao dos betões sem adições.

Ao contrário do observado nos ensaios acelerados, a incorporação de cinzas volantes foi efetiva na redução do coeficiente de difusão, para relações a/l até 0,55 e independentemente da dosagem de ligante e percentagem de substituição de cimento por cinzas.

As diferenças observadas entre os ensaios de imersão e os ensaios de migração estão essencialmente relacionadas com dois fatores: tempo de exposição e capacidade de fixação de cloretos. No ensaio de imersão o coeficiente de difusão foi determinado em betões sujeitos a 90 dias de exposição, após o período de cura especificado em 3.6. Desse modo, houve o tempo necessário para o desenvolvimento lento das reações pozolânicas, com consequente refinamento da microestrutura do betão. Esta evolução foi também notada nos ensaios de resistência mecânica (4.3), onde se verificou um crescimento significativo na resistência face aos betões sem adições, entre os 28 dias e os 90 dias de idade. Neste caso, o facto do ensaio se ter realizado em ambiente submerso também ajudou a que a progressão das reações tivesse sido efetiva.

Por outro lado, nos ensaios de imersão a capacidade de fixação de cloretos assume maior relevância, salientando o melhor desempenho usualmente reportado para os betões com cinzas, no que se refere a esta propriedade (Bogas 2011, Mo et al. 2017).

Da Figura 4.21 e Quadro 4.3 é interessante verificar que o desempenho deste tipo de betão tende a melhorar com o incremento da dosagem de cinzas volantes. Real e Bogas (2018) referem uma tendência similar para idênticas percentagens de substituição, contrariamente a Bogas (2011), que reporta uma descida de $D_{Cl,lm}$ para misturas com 22% de cinza volante, mas uma subida deste parâmetro quando a percentagem de substituição sobe para 40%. Neste caso, pode ter sido excedido o valor ótimo de substituição de cimento por cinzas.

No ensaio RCMT verificou-se uma tendência contrária, ou seja, o desempenho das misturas decresceu ligeiramente com o aumento da dosagem de ligante, o que se justifica em face da inatividade das cinzas à idade do ensaio. Conclui-se assim que no caso dos betões com cinzas, os ensaios acelerados de migração devem ser efetuados a idades superiores, de modo a traduzirem de forma mais adequada o comportamento real destes betões.

Como referido, nos betões com 30% de cinzas volante, o efeito global de reduzir a relação a/l foi inferior ao efeito causado pela introdução das cinzas volante. Neste caso, o coeficiente de difusão obtido num betão sem adições e com relação a/l de 0,35 foi superior ao verificado para uma mistura com 30% cinzas volante e relação a/l de 0,45. Este facto salienta a importância da utilização de adições pozolânicas em betões expostos em ambiente marítimo.

Relativamente às misturas com sílica de fumo, foram obtidos valores de coeficiente de difusão compreendidos entre $1,32 \times 10^{-12}$ e $5,22 \times 10^{-12}$ m²/s. Valores da mesma ordem de grandeza foram reportados por outros autores em ensaios de imersão a 90 dias (Hooton et al. 1997, Pun 1997).

Analisando a Figura 4.22 e Quadro 4.3 é possível verificar que a introdução de sílica provocou uma redução importante no coeficiente de difusão, para misturas com relação a/l inferior a 0,55. No entanto, nos betões com a/l de 0,55, o valor de $D_{Cl,lm}$ foi ligeiramente superior (10%) ao obtido nos betões com apenas CEM I.

Tal como discutido em 4.4, podendo ser atribuídas as mesmas razões, a eficiência da sílica de fumo diminuiu com o aumento da relação a/l. As tendências observadas nos ensaios de imersão estão de acordo com o verificado nos ensaios acelerados de migração de cloretos. No ensaio de

imersão, verifica-se que a introdução de 6% de sílica de fumo provoca uma redução de $D_{Cl,lm}$ de 43% e 37% para relações a/l de 0,35 e 0,45, respetivamente. Por outro lado, no ensaio RCMT verificou-se uma descida de 40% e 37% para relações a/l de 0,35 e 0,45, respetivamente. Neste sentido, pode-se concluir que o ensaio de migração de cloretos, realizado aos 28 dias de idade, foi capaz de classificar de forma adequada a difusibilidade dos betões produzidos com sílica de fumo. Isso realça a rápida reatividade pozolânica deste tipo de adições.

Apesar deste trabalho ter demonstrado o efeito benéfico da incorporação de apenas 6% de sílica de fumo na resistência à penetração de cloretos, as reduções atingidas no coeficiente de difusão foram aquém do reportado por outros autores, tendo em conta ensaios acelerados e de longa duração (Hooton et al. 1997, Gjørsv 1995).

Conforme discutido, as maiores dificuldades que se verificam na dispersão da sílica de fumo terão contribuído para a redução da sua eficiência. De qualquer forma, os resultados obtidos justificam a decisão tomada pelos países nórdicos em especificarem usualmente a incorporação de sílica de fumo nos betões sujeitos a ambientes severos de exposição marítima (Moreno, et al. 2015).

4.5.3. Concentração superficial de cloretos, C_s

A concentração superficial de cloretos é o segundo dos parâmetros que resultam do ajuste da curva teórica da 2ª Lei de Fick, aos dados obtidos experimentalmente no ensaio de imersão. Os valores obtidos encontram-se resumidos no Quadro 4.3, Figura 4.14 e Figura 4.24. No entanto, é de assinalar que estes valores de C_s não são reais, mas sim o resultado do ajuste das curvas teóricas de Fick. Ainda assim, dado que se tratam de ensaios de imersão em que a difusão é pouco afetada por fenómenos de absorção capilar, os valores estimados de C_s são próximos dos valores reais (Figura E.1 a Figura E.24).

Para o presente estudo foram obtidos valores de C_s compreendidos entre 1,6% e 4,9% da massa de ligante, correspondente a 0,33% e 1,07% da massa de betão, respetivamente.

Por análise da Figura 4.24, verifica-se que a concentração superficial de cloretos tem tendência a aumentar, com o aumento progressivo da relação a/l. Poulsen e Meljbro (2006) e Real e Bogas (2018) reportaram tendências semelhantes, enquanto que Bogas (2011) afirma não ter encontrado nenhuma influência significativa da relação a/l no valor da concentração superficial de cloretos, tendo em conta betões expostos durante 8 meses em imersão.

Em relação aos BEAL, verifica-se que no caso dos betões com agregados de maior porosidade (Leca), os valores de C_s tendem a ser mais elevados, em especial nos betões de maior a/l (0,45 e 0,55). O aumento de C_s foi de cerca de 1% da massa de ligante por cada incremento de 0,1 na relação a/l.

Bogas (2011) e Real e Bogas (2018) reportaram um comportamento relativo semelhante face aos BAN. Segundo os autores, este fenómeno pode ser explicado devido à maior porosidade característica dos agregados leves Leca. Os agregados localizados junto à superfície, encontram-se mais expostos e acessíveis à penetração de cloretos. Deste modo, os agregados

mais porosos acabam por funcionar como reservatórios, onde os íões cloreto têm tendência a se acumular, aumentando assim a sua concentração nas zonas superficiais do betão. Este fenómeno tenderá a ser tanto mais importante quanto maior a relação a/l , visto que os agregados são menos protegidos pela pasta circundante, de pior qualidade, e a saturação dos agregados é mais provável em ambiente imerso, permitindo a acumulação progressiva de cloretos no interior dos mesmos.

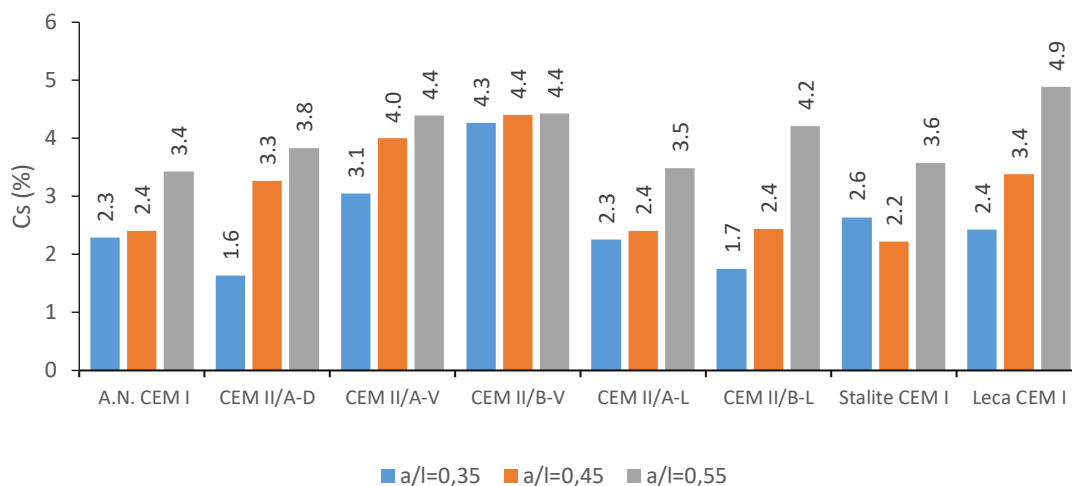


Figura 4.24 - Evolução da concentração superficial de cloretos em função da relação a/l , para betões com diferentes tipos de ligante e agregado

No que se refere aos BEAL com agregados de menor porosidade (Stalite), mais uma vez constata-se um comportamento idêntico ao evidenciado pelos BAN de igual composição. De facto, para um dado a/l , a variação de C_s entre os dois tipos de betão foi inferior a 10%.

Em relação à influência do tipo de ligante, nem sempre se verificou uma tendência clara da evolução de C_s em função da relação a/l .

No caso dos betões com cinzas ocorreu um claro incremento de C_s face aos betões sem adições, independentemente da relação a/l . Este aumento foi mais elevado para maiores percentagens de substituição de cimento por cinzas volantes. Face aos betões sem adições e dependendo da percentagem de substituição e relação a/l , C_s foi 30% a 87% superior nos betões com cinzas.

Os elevados valores de C_s observados nas misturas com cinzas volante podem ser essencialmente atribuídos à sua capacidade de fixação de cloretos. À medida que ocorre a penetração de cloretos na estrutura porosa do betão, estes iniciam uma interação física e química com o mesmo. Desta forma, parte do teor de cloretos tende a combinar-se com o betão, aumentando a sua concentração na superfície do betão. Por outro lado, visto que os betões com cinzas apresentaram os valores mais baixos do coeficiente de difusão (4.5.2), este fator contribuiu também para que exista uma maior acumulação de cloretos na superfície do betão (Real e Bogas 2018).

Tal como referido, os betões com cinzas volantes foram aqueles que apresentaram os coeficientes de difusão mais baixos. Por outro lado, constata-se nesta análise que são

igualmente os tipos de betões que apresentam os valores de C_s mais elevados, especialmente para 30% de substituição. Esta diferença no desempenho relativamente a estes dois parâmetros reflete-se no parâmetro de penetração, conforme analisado em 4.5.1. Isto demonstra a importância de se calcular o parâmetro de penetração na análise da resistência à penetração de cloretos dos betões.

No caso dos betões com sílica de fumo verifica-se que esta provocou um aumento da concentração superficial de cloretos (12 a 38%), com exceção do caso das misturas com relação a/l de 0,35, onde o valor de C_s diminuiu. De notar igualmente que este foi o tipo de betão que obteve o valor mais reduzido de C_s no ensaio de imersão. Isto deve-se ao efeito benéfico que a introdução de sílica de fumo provocou na resistência à penetração de cloretos destes betões, tendo baixado a sua concentração a todas as profundidades.

Em relação ao reportado na literatura, alguns autores reportam reduções de C_s nos betões com sílica de fumo (Poulsen e Mejlbro 2006, Pun 1997, Arias 2014), enquanto outros reportam tendências contrárias (Valipour et al. 2011).

O facto de o valor de C_s ter aumentado para relações a/l mais elevadas, evidencia uma maior concentração de cloretos junto à superfície, devido à capacidade de fixação proporcionada pela adição de sílica de fumo. No entanto, isso não se verificou para baixos valores de a/l. A menor eficiência da sílica de fumo para maiores a/l deverá também contribuir para os resultados obtidos.

No caso dos betões com filler calcário, verifica-se que os valores obtidos são da mesma ordem de grandeza dos obtidos nos betões sem adições. Estes betões são caracterizados por possuírem uma reduzida capacidade de fixação de cloretos. Deste modo, é natural que o teor de cloretos junto à superfície seja inferior e a sua distribuição em profundidade seja mais uniforme, até porque estes betões apresentam coeficientes de difusão elevados. De facto, observando os perfis de cloretos obtidos para estes tipos de betão (Anexo E), constata-se que, de uma forma geral, não existe uma queda abrupta da concentração de cloretos junto da superfície.

4.6. Correlação entre ensaios

Os ensaios a longo prazo, como é o caso do ensaio de imersão realizados neste trabalho, permitem uma melhor simulação da penetração de cloretos no betão em exposição real (Andrade, Castellote e Alonso, et al. 2000). Nestes ensaios, o processo de penetração de cloretos rege-se por fenómenos de difusão ao longo do tempo, em regime não estacionário, similares aos verificados em condições reais. No entanto, estes ensaios têm o inconveniente de exigirem longos períodos de tempo de modo a se obterem resultados com significado. Desta forma, surgiu a necessidade de se desenvolverem ensaios mais expeditos, que fossem capazes de caracterizar indiretamente a durabilidade dos betões. Dentro dos vários tipos de ensaios acelerados propostos na literatura, destaca-se o ensaio acelerado de migração de cloretos em regime não estacionário, que foi idealizado por Tang e Nilsson em 1992, e que é o considerado em alguns dos principais documentos normativos para a estimativa da vida útil dos betões (fib34

2006, E465 2005). Este método, especificado na norma NTBUILD (492), foi também o considerado no presente trabalho.

No Anexo F - Quadro F.2 comparam-se os coeficientes de difusão obtidos nos ensaios acelerados de migração com os determinados no ensaio de imersão. Na última coluna indica-se a variação percentual entre o coeficiente de difusão estimado no ensaio de imersão, $D_{cl,90d,im}$ e o determinado no ensaio de migração, $D_{cl,28d,RCMT}$.

Na Figura 4.25 apresenta-se, na forma gráfica, a relação entre os coeficientes de difusão obtidos nos dois ensaios. Em geral, observa-se uma tendência clara de ambos os ensaios evoluírem no mesmo sentido, isto é, aos maiores valores de $D_{cl,90d,im}$ correspondem os maiores valores de $D_{cl,28d,RCMT}$. A exceção ocorreu nos betões com cinzas, conforme se discute mais adiante.

Verifica-se que independentemente do tipo de ligante, agregado ou relação a/l, os valores de $D_{cl,RCMT}$ obtidos através do ensaio acelerado de migração de cloretos tendem a ser sempre superiores. Bogas (2011) e Elfmarkova et al. (2015) reportam uma tendência semelhante. No entanto, ambos os ensaios fornecem valores da mesma ordem de grandeza e são capazes de distinguir claramente a qualidade de cada tipo de betão.

Dados os diferentes mecanismos de transporte e condições de ensaio associados a ambos os ensaios, é natural que os valores dos coeficientes de difusão não possam ser diretamente comparáveis (Chlortest 2005). De facto, o ensaio de imersão baseia-se na difusão iónica, onde os iões estão sujeitos a um gradiente de concentração e se deslocam das zonas de maior para as zonas de menor concentração, enquanto que o ensaio RCMT se baseia na migração iónica, onde os iões estão sujeitos a uma diferença de potencial elétrico e se movem das zonas de maior para as zonas de menor potencial.

Por outro lado, a idade inicial e a duração dos ensaios implicam que existam diferenças significativas na maturidade dos betões. Esta diferença será mais significativa em betões com adições que desenvolvem reações pozolânicas lentas, como é o caso das cinzas volantes, pois o ensaio RCMT não permite que as mesmas se desenvolvam adequadamente. Por esse motivo, verifica-se uma fraca correlação entre os ensaios de imersão e de RCMT para este tipo de betões (Figura 4.25). Neste caso, conclui-se que o ensaio de RCMT pode não ser o mais adequado para avaliar a durabilidade de betões com cinzas, pelo menos para a idade em que a norma especifica a sua realização (28 dias).

Outro fator que influencia os resultados obtidos é a capacidade de fixação de cloretos. Segundo o grupo de trabalho Chlortest (2005), os resultados do ensaio RCMT são obtidos com a suposição de que a capacidade de fixação de cloretos é constante ao longo do ensaio. A curta duração do ensaio e a diferença de potencial elétrica aplicada tendem a reduzir significativamente o teor de cloretos fixados. Desta forma, Tang (1996) afirma que os resultados do ensaio de migração descrevem as propriedades de transporte de cloretos no betão, sob a condição de reduzida capacidade de fixação. Por outro lado, os ensaios de migração não permitem ter em consideração a redução do coeficiente de difusão ao longo do tempo, que

resulta do aumento de maturidade do betão e da influência progressiva das condições ambientais em que este se insere (Bogas 2011, Poulsen e Meljbro 2006). Assim, é natural que se obtenham coeficientes de difusão inferiores nos ensaios de imersão, como foi o caso do presente trabalho (Quadro F.2).

Andrade et al. (2000) reportam uma diferença menor entre os valores obtidos em ambos os ensaios, para betões de menor compactidade. De facto, analisando o Quadro F.2 percebemos que existe a tendência de a diferença percentual entre os resultados obtidos ser tanto maior, quanto maior for a compactidade do betão. Tal poderá estar relacionado com a maior velocidade de hidratação nos betões de menor a/l.

As reduzidas condições de fixação de cloretos nos ensaios de migração contribuem também para uma subestimativa da capacidade real dos betões com cinzas resistirem à penetração de cloretos. Assim, pelos motivos referidos, opta-se por não considerar as misturas com cinzas volante na correlação apresentada na Figura 4.26.

Apesar das diferenças referidas, diversos autores constataram que existe uma boa correlação entre os resultados obtidos através do ensaio de migração e do ensaio de imersão (Bogas 2011), (Real et al. 2015, Elfmarkova et al. 2015, Tang e Sorensen 2001, Chlortest 2005).

No presente trabalho, mesmo não tendo em consideração o caso já referido dos betões com cinzas, verifica-se uma fraca correlação entre os coeficientes de difusão obtidos nos dois ensaios, quando se têm em consideração todas as composições em simultâneo, para diferentes relações a/l, tipos de agregado e tipos e dosagens de ligante.

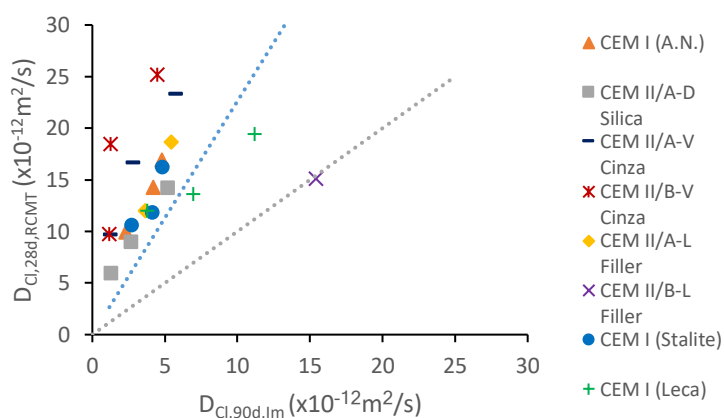


Figura 4.25 - Relação entre o coeficiente de difusão obtido no ensaio acelerado RCMT, $D_{Ci,28d,RCMT}$ e o coeficiente de difusão determinado nos ensaios de imersão, $D_{Ci,90d,im}$ (consideração de todos os betões estudados)

De facto, verifica-se que os betões com agregados de elevada porosidade (Leca) e os betões com 30% de filler calcário seguem uma tendência distinta dos restantes betões. Neste caso, o ensaio RCMT parece subestimar o coeficiente de difusão destes betões face à tendência dos restantes betões no ensaio de imersão. Em relação aos betões com 30% de filler calcário, conforme discutido, deverão ter sido obtidos resultados anómalos no presente trabalho. Para além disso, apenas foi possível obter um valor válido no ensaio RCMT. Dessa forma, na Figura 4.27 optou-se por remover estes betões da correlação entre os dois tipos de ensaios.

Nos betões com agregados leves mais porosos, visto que os ensaios de imersão deverão promover uma maior saturação dos betões, é possível que se estabeleçam mais facilmente passagens contínuas de água através dos agregados. Neste caso, deverá ocorrer uma maior participação dos agregados nos processos de difusão e isso reflete-se nas diferenças de $D_{cl,90d,im}$ e $D_{cl,28d,RCMT}$ (4.5.1). Para que o ensaio RCMT reflita melhor o comportamento relativo dos BEAL face aos BAN em ambientes de exposição XS2, sugere-se que estes ensaios se façam sobre provetes saturados, resultantes de uma cura contínua em água durante 28 dias.

Eliminando as curvas referidas de betões com cinzas, betões com 30% de filler e BEAL com agregados de elevada porosidade (Leca), verifica-se uma elevada correlação ($R^2=0.83$) entre os coeficientes de difusão obtidos nos dois tipos de ensaios (Figura 4.27). Conclui-se assim que para estes tipos de betão é possível considerar os ensaios RCMT na previsão do coeficiente de difusão do betão, em condições de exposição enquadradas na classe de exposição XS2.

Note-se ainda que nas correlações apresentada nas Figuras 4.25 a 4.27, optou-se por forçar a regressão linear a passar na origem. Apesar de se obterem melhores resultados sem a imposição desta condição, desta forma o significado físico dos ensaios não é distorcido.

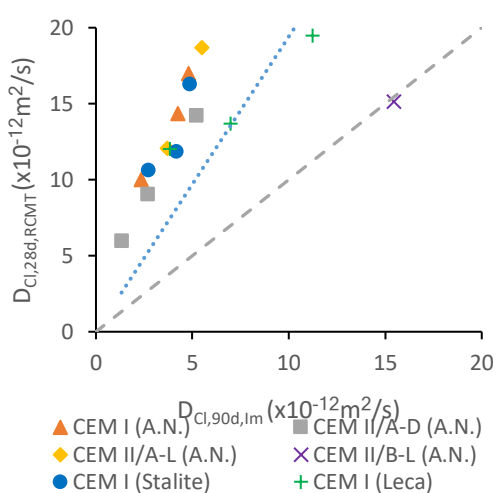


Figura 4.26 –Relação entre o coeficiente de difusão obtido no ensaio acelerado RCMT, $D_{cl,28d,RCMT}$ e o coeficiente de difusão determinado nos ensaios de imersão, $D_{cl,90d,im}$ (não considerando betões com cinzas volante)

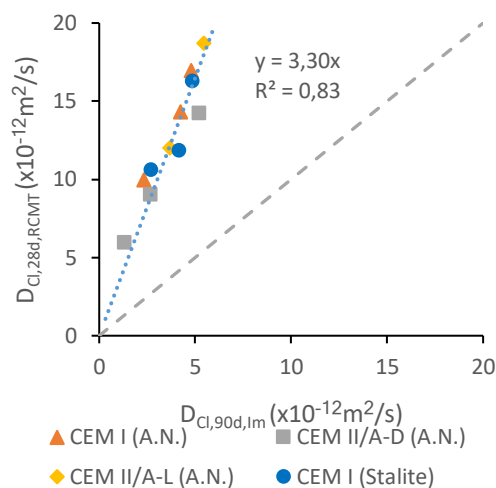


Figura 4.27 - Relação entre o coeficiente de difusão obtido no ensaio acelerado RCMT, $D_{cl,28d,RCMT}$ e o coeficiente de difusão determinado nos ensaios de imersão, $D_{cl,90d,im}$ (BAN com CEM I, CEM II/A-D e CEM II/A-L; BEAL com Stalite)

Embora se verifique uma correlação satisfatória entre os dois tipos de ensaio abordados neste trabalho, no que se refere ao coeficiente de difusão, conforme discutido em 3.8.4, a penetração de cloretos não depende apenas deste parâmetro, mas também da concentração superficial de cloretos. Assim, as propostas que classificam a durabilidade dos betões apenas em função dos resultados obtidos nos ensaios RCMT, como é o caso da classificação de Gjorv (1996; Quadro F.1), podem ser inadequadas.

Por este motivo, na Figura 4.28 optou-se também por relacionar os resultados obtidos nos ensaios RCMT ($D_{cl,RCMT}$) com os parâmetros K_{cr} determinados no ensaio de imersão, que já têm em conta a influência simultânea de D_{cl} e C_s . Pelo mesmo motivo anteriormente referido, na

Figura 4.28 não foram considerados os betões com cinzas, com 30% de filler e com Leca. Apesar de ambos os parâmetros analisados seguirem a mesma tendência, a dispersão de resultados mostra que K_{cr} não depende apenas de $D_{Cl,RCMT}$. De facto, enquanto que os betões com filler apresentaram maior D_{Cl} e C_s semelhante aos BAN, os betões com sílica apresentam menor D_{Cl} , mas maior C_s . Se os resultados obtidos nos betões com filler fossem eliminados, o coeficiente de correlação aumentaria para 0,82.

Tendo em conta a relação de $D_{Cl,90d,im}$ com K_{cr} , referentes apenas ao ensaio de imersão (Figura 4.29), agora também incluindo os betões com cinzas e com Leca, verifica-se uma boa correlação entre os dois parâmetros. Neste caso, apesar das diferenças de C_s existentes entre betões foi possível obter uma correlação elevada entre estes parâmetros. A elevada correlação resulta do facto de K_{cr} ser fortemente afetado pela relação a/l e, neste caso, D_{Cl} e C_s variarem no mesmo sentido em função de a/l . No entanto, quando é realizada uma análise mais fina, para uma dada relação a/l , a dispersão torna-se importante e a correlação entre K_{cr} e $D_{Cl,90d,im}$ deixa de ser elevada. De facto, como exemplo, verifica-se que apesar dos betões com CEM I e relação a/l de 0,45 terem apresentado um coeficiente de difusão 50% superior ao do betão com CEM II A-V de igual a/l , ambos apresentaram o mesmo valor de K_{cr} .

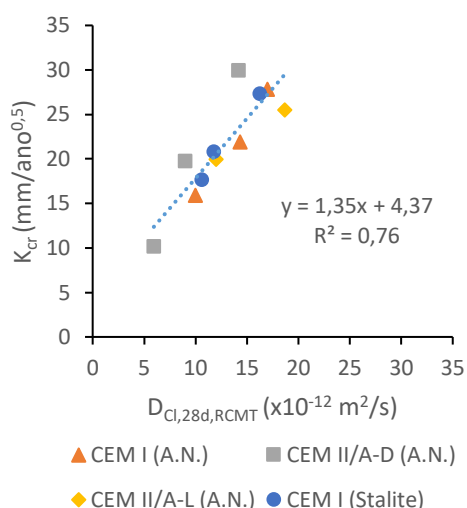


Figura 4.28 - Relação entre o coeficiente de difusão obtido no ensaio acelerado RCMT, $D_{Cl,RCMT}$ e o parâmetro K_{cr} determinado nos ensaios de imersão (BAN com CEM I, CEM II/A-D e CEM II/A-L; BEAL com Stalite).

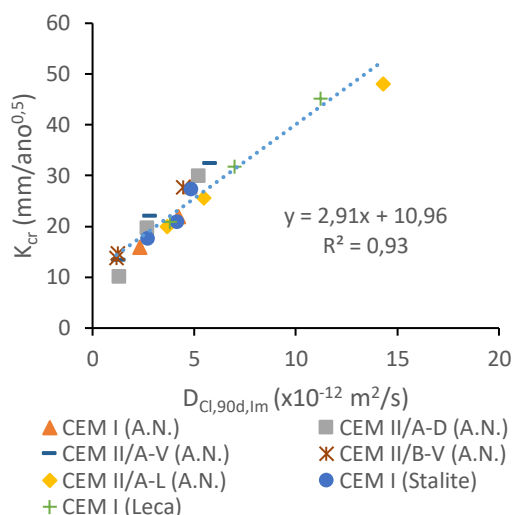


Figura 4.29 - Relação entre o coeficiente de difusão, $D_{Cl,90,im}$ e o parâmetro K_{cr} , ambos determinados nos ensaios de imersão (BAN com CEM I, CEM II/A-D, CEM II-AV, CEM II-BV e CEM II/A-L; BEAL com Stalite e com Leca).

Conclui-se assim que a variação de C_s entre betões pode ter uma influência significativa na durabilidade dos betões e o estabelecimento de uma classificação baseada apenas no ensaio RCMT pode ser não ser a mais adequada, pelo menos tendo em conta diferentes tipos de ligante e de agregado em simultâneo. Isso sugere que uma classificação mais rigorosa da durabilidade do betão, que seja baseada apenas nos resultados obtidos do ensaio RCMT deve ser estabelecida separadamente para cada tipo de ligante e, eventualmente, de agregado.

5. Conclusões

5.1. Conclusões gerais

Neste capítulo são apresentadas, de forma sucinta, as principais conclusões obtidas no presente trabalho, em especial no que se refere à caracterização da resistência à penetração de cloretos de diferentes tipos de betões, tendo em conta o ensaio acelerado de migração de cloretos e o ensaio de imersão em solução salina, que visava simular, em tempo real, condições de exposição XS2.

Tal como inicialmente pretendido, foi possível considerar betões de diferente classe de resistência à compressão e massa volúmica, alargando a abrangência do estudo realizado. Neste caso, foram produzidos betões de massa volúmica normal para classes de resistência C20/25 a C60/75, e betões leves estruturais nas classes de resistência entre LC20/22 e LC60/66 e classes de massa volúmica entre D1,6 e D2,0. Como seria esperado, a massa volúmica dos BAN foi essencialmente afetada pela relação a/c e, em segundo plano, pelo tipo e dosagem de adição. Nos BEAL, a relação a/l assumiu menor importância na massa volúmica do que o tipo de agregado. Tal como seria de esperar, verifica-se uma redução natural da massa volúmica fresca para a massa volúmica seca, sendo que esta redução foi superior nos betões com agregados de maior porosidade e maior capacidade de absorção.

A resistência à compressão foi fortemente condicionada pela qualidade da matriz cimentícia, ou seja, pela sua relação a/l e tipo de ligante. Nos BEAL, em função da idade e composições analisadas neste trabalho, a resistência à compressão foi também afetada pelo agregado, em especial nos betões com agregados de maior porosidade. Os betões com agregados leves menos porosos (Stalite) apresentaram um comportamento mecânico próximo do observado nos BAN de igual composição, o que levou a que apresentassem maior eficiência estrutural.

Ao contrário do que seria esperado, a introdução de sílica de fumo teve uma influência pouco significativa na resistência mecânica dos betões, devido essencialmente à dificuldade de dispersão desta adição. A cinza volante utilizada apenas contribuiu de forma efectiva para o aumento de produtos de hidratação e respetivo incremento da resistência mecânica após 28 dias de idade. Aos 28 dias, a resistência nos betões com cinzas foi similar à dos betões com filler calcário de igual composição, atuando apenas por efeito físico de filler e nucleação. No entanto, aos 90 dias, a resistência atingida foi similar à dos betões sem adições, demonstrando a capacidade reativa para o desenvolvimento de produtos de hidratação adicionais. Conclui-se assim que a atividade pozolânica deste tipo de betões apenas começa a ter efeito significativo entre os 28 e 90 dias. Nos betões com filler calcário obtiveram-se as maiores reduções de resistência mecânica, independentemente da relação a/l, idade do ensaio e percentagem de substituição.

No ensaio de migração acelerada de cloretos foram obtidos coeficientes de difusão compreendidos entre $5,95$ e $25,22 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, a que correspondem resistências à penetração

de cloretos “elevada” a “reduzida”, de acordo com a classificação proposta por Gjorv (1996). A relação a/l foi o principal fator que afetou os coeficientes de difusão determinados nos ensaios de migração, verificando-se uma influência pouco significativa do tipo de agregado. Esta tendência corrobora as conclusões obtidas por outros autores (Bogas 2011, Liu et al. 2010). No entanto, numa análise mais fina dos resultados conclui-se que os betões com Leca apresentaram, em média, uma resistência à penetração de cloretos ligeiramente inferior à dos BAN de igual composição. Os BEAL produzidos com Stalite evidenciaram propriedades de difusão semelhantes à dos BAN.

Em relação aos betões com adições, constata-se que a sílica de fumo foi a única capaz de contribuir para uma redução efectiva do coeficiente de difusão. Verifica-se que esta redução foi mais importante nos betões de menor relação a/l, para os quais se garantem melhores condições de refinamento da microestrutura e de dispersão da sílica de fumo. Para a reduzida idade em que foram realizados os ensaios, a incorporação de cinzas não foi efectiva no aumento da resistência à migração acelerada de cloretos. Para relações a/l iguais ou superiores a 0,45, verifica-se inclusivamente uma redução de desempenho face aos betões sem adições. O facto de o ensaio se realizar aos 28 dias não permite que as reações pozolânicas se desenvolvam adequadamente, tal como foi constatado no ensaio de resistência à compressão. Desta forma, à idade do ensaio, as partículas de cinzas volante tendem a atuar apenas essencialmente como filler, não conseguindo contrariar o decréscimo do teor de cimento e a consequente redução dos produtos de hidratação. O facto dos ensaios de migração se realizarem em condições de reduzida capacidade de fixação de cloretos também contribui para uma menor eficiência das cinzas volantes na resistência à penetração de cloretos. O efeito de diluição da quantidade de produtos de hidratação verificou-se igualmente nos betões em que o cimento foi substituído por filler calcário e, por isso, o coeficiente de difusão nestes betões aumentou com o aumento da relação a/c e percentagem de substituição.

No entanto, quando a sílica de fumo e a cinza volante foram consideradas como material de adição, a resistência à penetração de cloretos aumentou com o aumento da percentagem de adição introduzida na mistura. Neste caso, o melhor desempenho foi atingido nos betões com 6% de sílica de fumo e nos betões com 30% de cinzas volantes. Apesar da substituição de 15% de cimento por filler calcário ter sido prejudicial para a resistência à penetração de cloretos do betão, a sua utilização como material de adição não afetou esta propriedade, não prejudicando nem melhorando o seu comportamento.

No ensaio de imersão em solução salina, o coeficiente de difusão variou entre 1,2 e $41,3 \times 10^{-12}$ m²/s, a concentração superficial de cloretos variou entre 1,6 e 4,9% de massa de ligante e o parâmetro de penetração variou entre 10,1 e 86,5 mm/ano^{0,5}.

Verificou-se uma boa adequação das curvas deduzidas da segunda lei de Fick aos vários perfis de cloretos. A redução progressiva da concentração de cloretos na espessura do betão, segundo a lei de Fick, demonstra que o mecanismo de transporte predominante foi a difusão, não se tendo verificado fenómenos relevantes de absorção capilar.

À semelhança do verificado no ensaio RCMT, a qualidade da pasta foi o fator com maior influência na penetração de cloretos. Em relação ao tipo de agregado, os betões com Leca apresentaram menores resistências à penetração de cloretos, resultado de conduzirem a maiores coeficientes de difusão e de concentração superficial de cloretos. A participação dos agregados leves na difusão de cloretos não foi desprezável. Para tal, deverá ter contribuído o facto de os ensaios de imersão terem sido realizados em condições para as quais os agregados estariam saturados. No entanto, à semelhança do verificado por outros autores em ensaios acelerados (Bogas 2015, Real et al. 2015), os betões com Stalite apresentaram comportamento semelhante ao dos BAN de igual composição. A maior porosidade e difusibilidade destes agregados face aos de massa volúmica normal, terá sido compensada pela melhor qualidade da zona de transição característica deste tipo de betão. A concentração superficial de cloretos aumentou com o aumento da porosidade do agregado, em especial nos betões de maior a/l . Esta tendência é atribuída ao facto de os agregados mais porosos funcionarem como locais de acumulação de cloretos, aumentando a sua concentração nas zonas superficiais do betão, em que estes encontram-se mais acessíveis.

Contrariamente ao observado no ensaio RCMT, a substituição de cimento por cinza volante conduziu ao aumento da resistência à penetração de cloretos. A introdução de cinza volante na mistura implicou uma descida significativa do coeficiente de difusão que permitiu compensar o aumento verificado na concentração superficial de cloretos. Desse modo, face aos betões sem adições, ocorreu uma redução do parâmetro de penetração, sendo esta diminuição tanto maior, quanto maior a percentagem de substituição. A idade mais avançada em que foram conduzidos os ensaios de imersão e as condições mais propícias para a fixação de cloretos justificam as diferentes tendências observadas face aos ensaios de migração.

Apesar da dificuldade de dispersão da sílica de fumo, os betões com apenas 6% destas adições apresentam os menores coeficientes de difusão (a par dos betões com cinzas) e os menores parâmetros de penetração de cloretos. Estes resultados justificam a opção de se considerar a incorporação de uma quantidade mínima de sílica de fumo em betões sujeitos a ambientes severos de ataque de cloretos. À semelhança do verificado no ensaio de migração, a sílica de fumo foi menos eficiente nos betões de maior a/l . A concentração superficial de cloretos foi pouco afetada pela incorporação de sílica de fumo.

Os ensaios de imersão permitiram confirmar o fraco desempenho dos betões com incorporação de filler calcário. Tal como constatado no ensaio de migração, ocorreu um incremento significativo do coeficiente de difusão, independentemente da relação a/l e percentagem de substituição.

Ambos os ensaios de migração e de imersão foram capazes de distinguir claramente a qualidade dos diferentes tipos de betão, permitindo a sua classificação em termos de desempenho. Para tal contribuiu o facto de ambos os ensaios serem afetados da mesma forma pela variação da relação a/l .

Visto que o ensaio de migração e o ensaio de imersão foram realizados para diferentes maturidades do betão e implicando distintas condições de capacidade de fixação, verificou-se uma fraca correlação entre os coeficientes de difusão obtidos destes ensaios, em especial nos betões com cinzas, cujas reações pozolânicas desenvolvem-se lentamente. Conclui-se que o ensaio de migração, no caso dos betões com cinzas, deve ser realizado para idades superiores a 28 dias.

Verificou-se também uma maior penalização do coeficiente de difusão dos BEAL com agregados mais porosos, face ao obtido nos ensaios de migração. Tal deverá resultar das diferentes condições de saturação dos agregados em ambos os ensaios. Porém, obteve-se uma correlação elevada entre ensaios quando os casos particulares de betões com cinzas e BEAL de menor massa volúmica (Leca) não foram tidos em consideração. Conclui-se que nestes casos o ensaio RCMT pode ser considerado na classificação das propriedades de difusão de betões em classe XS2. No entanto, a penetração de cloretos não depende apenas do coeficiente de difusão. Relacionando os coeficientes de difusão obtidos em ambos os ensaios, com o parâmetro de penetração obtido no ensaio de imersão, é possível concluir que a variação de C_s entre betões pode ter uma influência significativa na durabilidade dos mesmos. Deste modo, o estabelecimento de uma classificação da resistência à penetração de cloretos baseada apenas no ensaio RCMT pode ser inadequado, devendo esta ser feita separadamente para cada tipo de ligante e, eventualmente, de agregado. Ainda assim, é possível obter uma correlação elevada entre o coeficiente de difusão e o parâmetro de penetração, devido ao facto de ambos serem fortemente afetados pela relação a/l e D_{cl} e C_s variarem no mesmo sentido em função deste fator.

5.2. Propostas de desenvolvimento futuro

A realização e desenvolvimento do presente trabalho permitiu melhorar o nível de conhecimento sobre o desempenho de diversos tipos de betão expostos em ambiente submerso, no entanto, são ainda várias as incertezas e as necessidades de investigação neste domínio, que tem sido alvo de vários estudos realizados por outros autores. Entre outros exemplos, referem-se alguns temas que justificam o desenvolvimento de futuros trabalhos de investigação:

- Realização do ensaio acelerado de migração de cloretos a uma idade mais avançada, de forma a permitir o desenvolvimento adequado das reações pozolânicas e perceber qual o impacto na correlação entre ambos os ensaios;
- Realização do ensaio de imersão para diferentes idades, de forma a permitir analisar a evolução da resistência à penetração de cloretos, com quantificação dos coeficientes de idade.
- Análise da adequabilidade e aplicabilidade do ensaio RCMT, por comparação com ensaios de imersão realizados em condições de ambiente real e em outros tipos de exposição.
- Avaliação da adequabilidade dos ensaios acelerados aos modelos de previsão de vida útil sugeridos na normalização. Aferição e refinamento dos principais parâmetros que regem estes modelos.

Bibliografia

- Abbas, Yawar, Farhad Pargar, Dessi A. Koleva, Klaas van Breugel, Wouter Olthuis, e Albert van den Berg. 2018. "Non-destructive measurement of chloride ions concentration in concrete – A comparative analysis of limitations and prospects." *Construction and Building Materials*.
- Alonso, C., C. Andrade, M. Castellote, e P. Castro-Borges. 2000. "Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar." *Cement and Concrete Research* (Elsevier) 30: 1047-1055.
- Andrade, C., M. Castellote, C. Alonso, e C. González. 2000. "Non-steady-state chloride diffusion coefficients obtained from migration and natural diffusion tests. Part I: Comparison between several methods of calculation." *Materials and Structures* 33.
- Andrade, C., M. Castellote, e R. d'Andrea. 2011. "Measurement of ageing effect on chloride diffusion coefficients in cementitious matrices." *Journal of Nuclear Materials*.
- Angst, Ueli, Bernhard Elsener, Claus K. Larsen, e Øystein Vennesland. 2009. "Critical chloride content in reinforced concrete — A review." *Cement and Concrete Research*.
- Ann, Ki Yong, e Ha-Won Song. 2007. "Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete." *Corrosion Science* 49.
- Arias, Wendy Johanna. 2014. "Bulk Diffusion Of High Performance Concrete Specimens Exposed To Different Levels Of Sodium Chloride And Seawater." *A Thesis Submitted to the Faculty of The College of Engineering and Computer Science for the Degree of Master of Science*.
- Arya, C., e e Y. Xu. 1995. "Effect of cement type on chloride binding and corrosion of steel in concrete." *Cement and Concrete Research*.
- Arya, C., N.R. Buenfeld, e J.B. Newman. 1990. "Factors influencing chloride binding in concrete." 20: 291–300.
- Azad, Abul K. 1998. "Abstract Chloride Diffusion In Concrete And Its Impact On Corrosion Of Reinforcement." *King Fahd University of Petroleum and Minerals*.
- Berke, N.S., D.W. Pfeifer, e T.G Weil. 1988. "Protection Against Chloride-Induced Corrosion." *Concrete International Design & Construction* 10.
- Bertolini, Luca, Bernhard Elsener, Pietri Pedefferri, e Rob Polder. 2004. *Corrosion of steel in concrete – Prevention, Diagnosis, Repair*. Wiley-VCH.
- Bogas, J. Alexandre. 2011. "Caracterização de betões estruturais com agregados leves de argila expandida." *Tese para obtenção do grau de Doutor em engenharia civil, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico (IST)*.

- Bogas, J. Alexandre, Augusto Gomes, e M.F.C. Pereira. 2012. "Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate." *Construction and Building Materials* 35: 1013–1022.
- Bogas, J. Alexandre, e Augusto Gomes. 2013. "Compressive behavior and failure modes of structural lightweight aggregate concrete – Characterization and strength prediction." *Materials and Design* 46: 832–841.
- Bogas, J. Alexandre, e Augusto Gomes. 2015. "Non-steady-state accelerated chloride penetration resistance of structural lightweight aggregate concrete." *Cement & Concrete Composites* 60: 111–122.
- Bogas, J. Alexandre, J. de Brito, e J. Cabaço. 2014a. "Long-term behaviour of concrete produced with recycled lightweight expanded clay aggregate concrete." *Construction and Building Materials*.
- Bogas, J. Alexandre, J. de Brito, e J.M. Figueiredo. 2015. "Mechanical characterization of concrete produced with recycled lightweight expanded clay aggregate concrete." *Journal of Cleaner Production* 89: 187-195.
- Bogas, J. Alexandre, M. Glória Gomes, e Sofia Real. 2014b. "Capillary absorption of structural lightweight aggregate concrete." *Materials and Structures*.
- Bogas, J. Alexandre, Rita Nogueira, e Nuno G. Almeida. 2014c. "Influence of mineral additions and different compositional parameters on the shrinkage of structural expanded clay lightweight concrete." *Materials and Design* 56: 1039–1048.
- Bonavetti, V, H Donza, G Menendez, O Cabrera, e EF Irassar. 2003. "Limestone filler cement in low w/c concrete: A rational use of energy." *Cem Concr Res* 33.
- Boubitsas, Dimitriou. s.d. "Replacement of Cement by Limestone Filler or Ground Granulate Blast Furnace Slag: the Effect on Chloride Penetration in Cement Mortars." *SP Technical Research Institute of Sweden*.
- Bouzoubaa, N, MH Zhang, VM Malhotra, e DM Golden. 2001. "Mechanical properties and durability of laboratory produced high-volume fly ash blended cements." *ACI Special Publication* 199.
- Camões, Aires. 2002. "Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes." *Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil. Universidade do Minho*.
- Castellote, M, e C. Andrade. 2006. "Round-Robin Test on methods for determining chloride transport parameters in concrete." *Materials and Structures* 955-990.
- Chia, Kok Seng, e Min-Hong Zhang. 2001. "Water permeability and chloride penetrability of high-strength lightweight aggregate concrete." *Cement and Concrete Research* 32: 639–645.
- Chloritest. 2005. *Guideline for practical use of methods for testing the resistance of concrete to chloride ingress*.

- Cigna, R., C. Andrade, U. Nürnberger, R. Polder, R. Weydert, e E. Seitz. 2002. "Corrosion of Steel in Reinforced Concrete Structures." *COST 521: Final Report*.
- Concrete, Chloride Resistance of. 2009. *Cement Concrete & Aggregates Australia*.
- Cong, X., S. Gong, D. Darwin, e SL. McCabe. 1989. "Role of silica fume in compressive strength of cement paste, mortar, and concrete." 89: 375–387.
- Cortês, João. 2014. *Resistência À Penetração De Cloretos De Betões Estruturais De Agregados Leves*. Lisboa: Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico.
- Costa, António José da Silva. 1997. "Durabilidade de estruturas de betão armado em ambiente marítimo." *Tese para obtenção do Grau de Doutor em engenharia civil. Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior Técnico*.
- Costa, António, e Júlio Appleton. 1999. "Análise da Penetração de Cloretos em Estruturas de Betão Armado Expostas ao Ambiente Marítimo." *Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas (RPEE)*.
- Demirboğa, Ramazan, brahim Örüng, e Rüstem Gül. 2001. "Effects of expanded perlite aggregate and mineral admixtures on the compressive strength of low-density concretes." *Cement and Concrete Research* 31.
- Dhir, R. K., M. A. K. El-Mohr, e T. D. Dyer. 1997. "Developing chloride resisting concrete using PFA." *Cement and Concrete Research* 27: 1633-1639.
- Dhir, RK, e MR Jones. 1999. "Development of chloride-resisting concrete using fly ash." 137–42.
- Dhir, RK, MR Jones, e MJ McCarthy. 1994. "PFA concrete: chloride-induced reinforcement corrosion." *Mag Concr Res* 46: 269–77.
- E383. 1993. "Determinação da resistência à penetração de cloretos. Método da célula de difusão." *Especificação LNEC*.
- E390. 1993. "Betões. Determinação da resistência à penetração de cloretos. Ensaio de imersão." *Especificação LNEC*.
- E463. 2004. "Betões. Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário." *Especificação LNEC*.
- E464. 2016. "Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais." *Especificação LNEC*.
- E465. 2005. "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." *Especificação LNEC*.
- Elfmarkova, V., P. Spiesz, e H.J.H. Brouwers. 2015. "Determination of the chloride diffusion coefficient in blended cement mortars." *Cement and Concrete Research*.

- EuroLightConR2. 1998. "LWAC Material Properties, State-of-the-Art." *European Union – Brite EuRam III 23*.
- EuroLightConR4. 1999. "Methods for testing fresh lightweight aggregate concrete." *European Union – Brite EuRam III 53*.
- fib1. 1999. "Volume 1: Introduction - Design Process – Materials." De Volume 1: Introduction - Design Process Materials.
- fib34. 2006. *bulletin 34 - Model code for service life design*. Lausanne: CEB/FIP Working Group 5.6 on Lightweight Aggregate Concrete. FIB – Fédération internationale du béton.
- FIP. 1983. *FIP manual of Lightweight aggregate concrete*. Surrey University Press.
- Frederiksen, J.M, Nilsson L.-O., E. Poulsen, P. Sandberg, L. Tang, e A Andersen. 1997. "HETEK - A system for estimation of chloride ingress into concrete. Theoretical background." *Danish Road Directorate*.
- Gao, Y., G. De Schutter, G. Ye, Z. Tan, e K. Wu. 2014. "The ITZ microstructure, thickness and porosity in blended cementitious composite: Effects of curing age, water to binder ratio and aggregate content." 60: 1-13.
- Garboczi, Edward. 1995. "Microstructure and transport properties of concrete." Em *Rilem Report 12 – Performance Criteria for Concrete Durability*, de J. Kropp e H. K. Hilsdorf, 198- 212. E&FN Spon.
- Ghrici, M, S Katsioti, e M Said-Mansour. 2007. "Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cement." *Cem Concr Comp* 29: 542–549.
- Gjørsv, O.E. 1996. "Performance and serviceability of concrete structures in the marine environment." *Symposium on Concrete for Marine Structures*.
- Gjørsv, Odd E. 1995. "Effect of condensed silica fume on steel corrosion in concrete." *ACI materials Journal* 92: 591-598.
- Glass, G.K., e N.R. Buenfeld. 2000. "The influence of chloride binding on the chloride induced corrosion risk in reinforced concrete." *Corrosion Science* 42.
- Gomes, Augusto, Ana Paula Ferreira Pinto, e João Bessa Pinto. 2013. *Cimento Portland e Adições*. Lisboa: Materiais de Construção I, Instituto Superior Técnico.
- Hammer, T.A. 1995. "The influence of lightweight aggregates properties on material properties of the concrete." Editado por I. Holand et al. *International Symposium on structural lightweight aggregate Concrete* 517-532.
- Hausmann, D.A. 1967. "Steel corrosion in concrete - How does it occur?" 6: 19-23.
- Helland, D S, e AS. Selmer. 2000. "Lightweight Aggregate Concrete in Norwegian Bridges." *Expanded Shale, Clay and Slate Institute public*.

- Henkensiefken, Ryan, Javier Castro, Dale Bentz, Tommy Nantung, e Jason Weiss. 2009. "Water absorption in internally cured mortar made with water-filled lightweight aggregate." *Cement and Concrete Research* 89: 883–892.
- Hetek53. 1996. *Chloride penetration into concrete, State of the Art. Transport processes, corrosion initiation, test methods and prediction models*. Vol. Report No. 53. Road Directorate.
- Holm, T. A., e T. W. Bremner. 2000. "State-of-the-art report on high-strength, high-durability structural low-density concrete for applications in severe marine environments." 104.
- Hooton, R.D., P. Pun, T. Kojundic, e P. Fidjestol. s.d. "Influence Of Silica Fume On Chloride Resistance Of Concrete." *University of Toronto*.
- Hornain, H., J. Marchandx, V. Duhots, e M. Moranville-Regourd. 1995. "Diffusion Of Chloride Ions In Limestone Filler Blended Cement Pastes And Mortars." *Cement and Concrete Research*, 25: 1667-1678.
- Irassar, E.F., V.L. Bonavetti, G. Menéndez, H. Donza, e O. Cabrera. 2001. "Mechanical Properties and Durability of Concrete Made with Portland Limestone Cement." *ACI Special Publication* 201: 431-450.
- Kılıç, Alaettin, Cengiz Duran Atış, Ergül Yaşar, e Fatih Özcan. 2003. "High-strength lightweight concrete made with scoria aggregate containing mineral admixtures." *Cement and Concrete Research* 33.
- Kropp, J., Hubert K. Hilsdorf, Horst Grube, Carmen Andrade, e Lars-Olof Nilsson. 1995. "2. Transport mechanisms and definitions." Em *Rilem Report 12 – Performance Criteria for Concrete Durability*, de J.Kropp e H.K.Hilsdorf. State of the art report by rilem technical committee TC 116-PCD, Performance of concrete as a criterion of its durability. E&FN Spon.
- Kropp, Jörg. 1995. "5. Relations between transport characteristics and durability." Em *RILEM REPORT 12 Performance Criteria for Concrete Durability*, de Jörg Kropp e H.K.Hilsdorf. State of the Art Report prepared by RILEM Technical Committee TC 116–PCD.
- Kropp, Jörg. 1995. "6. Chlorides in Concrete." Em *RILEM REPORT 12 Performance Criteria for Concrete Durability*, de Jörg Kropp e Hubert K.Hilsdorf. State of the Art Report prepared by RILEM Technical Committee TC 116–PCD.
- Larsson, J. 1995. "The enrichment of chlorides in expressed concrete pore solution submerged in saline solution." *Lund University of Technology, Report TVBM-3064*.
- Li, Chenzhi, Linhua Jiang, Ning Xu, e Shaobo Jiang. 2018. "Pore structure and permeability of concrete with high volume of limestone powder addition." *Powder Technology* 338: 416–424.

- Liu, Jun, Xiaodong Wang, Qiwen Qiu, Guangfeng Ou, e Feng Xing. 2017. "Understanding the effect of curing age on the chloride resistance of fly ash blended concrete by rapid chloride migration test." *Materials Chemistry and Physics*.
- Liu, Xuemei, Kok Seng Chia, e Min-Hong Zhang. 2010. "Development of lightweight concrete with high resistance to water and chloride-ion penetration." *Cement & Concrete Composites* 32: 757–766.
- Lo, T.Y. 2004. "Influence of aggregate pre-wetting and fly ash on mechanical properties of lightweight concrete." *Waste Management* 24: 333-338.
- Lollini, Federica, Elena Redaelli, e Luca Bertolini. 2013. "Effects of portland cement replacement with limestone on the properties of hardened concrete ." *Cement & Concrete Composites*.
- Manera, M., Ø. Vennesland, e L. Bertolini. 2008. "Chloride threshold for rebar corrosion in concrete with addition of silica fume." *Corrosion Science* 554–60.
- Mehta, Kumar, e Paulo Monteiro. 2006. *Microstructure, properties and materials*. 3rd edition. McGraw-Hill.
- Mo, Kim Hung, Tung-Chai Ling, U. Johnson Alengaram, Soon Poh Yap, e Choon Wah Yuen. 2017. "Overview of supplementary cementitious materials usage in lightweight aggregate concrete." *Construction and Building Materials* 139: 403–418.
- Moffatt, E.G., e M.D.A. Thomas. 2018. "Performance of 25-year-old silica fume and fly ash lightweight concrete blocks in a harsh marine environment ." *Cement and Concrete Research*.
- Moreno, E. I., R. G. Solís-Carcaño, J. Varela-Rivera, J. C. Pacho-Monforte, e R. A. Cua-Cuevas. 2015. "Diffusion of Chlorides in Pozzolanic Concrete made with High- absorption Aggregates Exposed under Tropical Marine Environment." *International Journal Of Electrochemical Science* 10: 6444 - 6453.
- Muthulingam, S., e B.N. Rao. 2015. "Non-uniform corrosion states of rebar in concrete under chloride environment." *Corrosion Science*.
- Nanukuttan, S.V., P.A.M. Basheer, W.J. McCarter, L. Tang, N. Holmes, T.M. Chrisp, G. Starrs, e B. Magee. 2015. "The performance of concrete exposed to marine environments: Predictive modelling and use of laboratory/on site test methods." *Construction and Building Materials*.
- Nath, P., e P. Sarker. 2011. "Effect of fly ash on the durability properties of high strength concrete." *Procedia Eng., Elsevier* 1149-1156.
- Neville, A.M. 1995. *Properties of concrete*. 5th edition. Harlow, England: Pearson Education Limited.
- NPEN1097-3. 2000. "Ensaio para determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 2: Método para determinação da massa volúmica e dos vazios." *IPQ*.

- NPEN1097-6. 2003. “Ensaio para determinação das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água.” *IPQ*.
- NPEN12350-2. 2009. “Ensaio do betão fresco. Parte 2: Ensaio de abaixamento.” *IPQ*.
- NPEN12350-6. 2009. “Ensaio do betão fresco. Parte 6: Massa volúmica.” *IPQ*.
- NPEN12390-2. 2000. “Ensaio do betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica.” *IPQ*.
- NPEN12390-3. 2011. “Ensaio do betão endurecido. Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica.” *IPQ*.
- NPEN12390-7. 2009. “Ensaio do betão endurecido. Parte 7: Massa volúmica do betão endurecido.” *IPQ*.
- NPEN12620. 2004. *Agregados para betão*. Lisboa: IPQ.
- NPEN13055-1. 2005. *Agregados leves. Parte 1: Agregados leves para betão, argamassas e caldas de injeção*. Lisboa: IPQ.
- NPEN197-1. 2012. “Cimento. Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes.” *Especificação LNEC*.
- NPEN206-1. 2007. *Betão. Parte 1 Especificação, desempenho, produção e conformidade*. Lisboa: IPQ.
- NPEN933-1. 2014. *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica - Método de peneiração*. Lisboa: IPQ.
- NPEN933-2. 1999. “Ensaio para determinação das características geométricas dos agregados – Parte 2: Determinação da distribuição granulométrica. Peneiros de ensaio, dimensão nominal das aberturas. Método de peneiração.” *IPQ*.
- NPEN933-4. 2002. “Ensaio para determinação das propriedades geométricas dos agregados – Parte 2: Determinação da forma das partículas. Índice de forma.” *IPQ*.
- NTBUILD443. 1995. “Northtest Method. Concrete Hardened: Accelerated Chloride penetration.” *Nordtest 443*.
- NTBUILD492. 1999. “Concrete, Mortar and Cement Based Repair Materials: Chloride Migration coefficient from Non-steady State Migration Experiments.” *Nordtest 492*.
- Odriozola, M. A. B., e P. A. Gutiérrez. 2007. “Permeabilidad a los cloruros del hormigón armado situado en ambiente marino sumergido.” *Revista Ingeniería de Construcción* 1.
- Oh, B.H., S.Y. Jang, e Y.S. Shin. 2003. “Experimental investigation of the threshold chloride concentration for corrosion initiation in reinforced concrete structures.” *Magazine of Concrete Research* 55: 117–124.

- P. Schiessl, e W. Breit. 1996. "Local repair measures at concrete structures damaged by reinforcement corrosion — aspects of durability." *Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction* 525–534.
- Page, C.L., e O Vennesland. 1983. "Pore Solution Composition and Chloride Binding Capacity of Silica-Fume Cernent Pastes." *Materials and Structures* 16: 19-25.
- Petcherdchoo, A. 2013. "Time dependent models of apparent diffusion and surface chloride for chloride transport in fly ash concrete." *Construction and Building Materials*.
- Pettersson, K. 1995. "Chloride threshold value and the corrosion rate in reinforced concrete." *Proceedings of the Nordic Seminar* 257–66.
- Pla, C., A.J. Tenza-Abril, J. Valdes-Abellan, e D. Benavente. 2018. "Influence of microstructure on fluid transport and mechanical properties in structural concrete produced with lightweight clay aggregates." *Construction and Building Materials* 171: 388–396.
- Poulsen, Ervin, e Leif Mejlbro. 2006. *Diffusion of chloride in concrete-theory and application*. London and New York: Modern concrete technology 14. Taylor & Francis.
- Poupard, Olivier, Paul Dumargue, e Abdelkarim Aït-Mokhtar. 2004. "Corrosion by chlorides in reinforced concrete: Determination of chloride concentration threshold by impedance spectroscopy." *Cement and Concrete Research*.
- Powers, T.C., L. E. Copeland, J. C. Hayes, e H.M. Mann. 1954. "Permeability of portland cement paste." *ACI journal* 51.
- Pun, Pierre. 1997. "Influence of Silica Fume on Chloride Raistance of Concrete." *A thesis submitted for the degree of Master of Applied Science Department of Civil Engineering*.
- Real, Sofia, e José Alexandre Bogas. 2018. "Chloride ingress into structural lightweight aggregate concrete in real marine environment." *Marine Structures*.
- Real, Sofia, J. Alexandre Bogas, e Jorge Pontes. 2015. "Chloride migration in structural lightweight aggregate concrete produced with different binders." *Construction and Building Materials*.
- Roberts, MH. 1962. "Effect of calcium chloride on the durability of pre- tensioned wire in prestressed concrete." *Mag Concr Res*.
- Safehian, M., e A. Ramezaniapour. 2013. "Assessment of service life models for determination of chloride penetration into silica fume concrete in the severe marine environmental condition." *Construction and Building Materials* 48: 287-294.
- Sandberg, P. 1995. "Critical evaluation of factores affecting chloride initiated reinforcement corrosion in concrete." *Sweden : University of Lund - Lund Institute of Technology - Division of Building Materials* (Report TVBM-3068).
- Saraswathy, V., e H.-W. Song. 2007. "Effectiveness of fly ash activation on the corrosion performance of steel embedded in concrete." *Mag. Concr. Res.* 59.

- Schiessl, Peter. 1996. "Durability of reinforced concrete structures." *Construction and Building Materials*.
- Shafigh, Payam, U.Johnson Alengaram, Hilmi Bin Mahmud, e Mohd Zamin Jumaat. 2013. "Engineering properties of oil palm shell lightweight concrete containing fly ash." *Materials & Design* 49: 613-621.
- Shi, Xianming, Ning Xie, Keith Fortune, e Jing Gong. 2011. "Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview." *Construction and Building Materials* 125–138.
- Siddique, Rafat. 2011. "Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties." *Resources, Conservation and Recycling* 55: 923–932.
- Song, Ha-Won, Chang-Hong Lee, e Ki Yong Ann. 2008. "Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments." *Cement and Concrete Composites* 30: 113-121 .
- Spiesz, P., e H.J.H. Brouwers. 2013. "The apparent and effective chloride migration coefficients obtained in migration tests ." *Cement and Concrete Research* .
- Swamy, R.N., H. Hamada, e J.C. Laiw. 1994. "Acritical evaluation of chloride penetration into concrete in marine environment." 404-419.
- Tang, L., e H. E. Sørensen. 2001. "Precision of the Nordic test methods for measuring the chloride diffusion/migration coefficients of concrete." *Materials and Structures*.
- Tang, L., e H. E. Sørensen. 2001. "Precision of the Nordic test methods for measuring the chloride diffusion/migration coefficients of concrete." *Materials and Structures* 34.
- Tang, L., e L.O. Nilsson. 1992. "Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field." *ACI Materials Journal*.
- Tang, Luping. 1996. "Chloride transport in concrete – Measurment and prediction." *Department Building Mateirals, Chalmers University of Technology. Doctoral Thesis*.
- Tang, Luping, Peter Utgenannt, Anders Lindvall, e Dimitrios Boubitsas. 2010. "Validation of models and test methods for assessment of durability of concrete structures in the road environment." *CBI Betonginstituttet*.
- Thomas, Michael. 1996. "Chloride thresholds in marine concrete." *Cement and Concrete Research* 26: 513-519.
- Thomas, Michael D. A., e Phil B. Bamforth. 1999. "Modelling chloride diffusion in concrete: Effect of fly ash and slag." *Cement and Concrete Research* 29: 487-495.
- Thomas, Michael. 2007. "Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete." *Portland Cement Association*.
- Thomas, Michael. 2016. *The durability of concrete for marine construction: materials and properties*. University of New Brunswick, Fredericton: University of New Brunswick.

- Thomas, Michael, e Theodore Bremner. 2012. "Performance of lightweight aggregate concrete containing slag after 25 years in a harsh marine environment." *Cement and Concrete Research* 42: 358-364 .
- Torres-Luque, M., E. Bastidas-Arteaga, F. Schoefs, M. Sánchez-Silva, e J.F. Osma. 2014. "Non-destructive methods for measuring chloride ingress into concrete: State-of-the-art and future challenges." *Construction and Building Materials*.
- Tritthart, Josef. 1989. "Chloride binding in cement II. The influence of the hydroxide concentration in the pore solution of hardened cement paste on chloride binding." *Cement and Concrete Research*.
- Tuutti, Kyösti. 1982. "Corrosion of steel in concrete." *Concrete Swedish Cement and Concrete Research Institute*.
- Uysal, M., K. Yilmaz, e M. Ipek. 2012. "The effect of mineral admixtures on mechanical properties, chloride ion permeability and impermeability of self-compacting concrete." *Constr. Build. Mater.* 27.
- Valipour, Mahdi, Farhad Pargar, Mohammad Shekarchi, e Sara Khani. 2011. "Study of Variation in Surface Chloride of Concrete Containing Different Pozzolans When Exposed to a Tidal Climate in the Persian Gulf Region." *International Conference On Durability Of Building Materials And Components*.
- Vaysburd, A. M. 1992. "Durability of lightweight concrete and its connections with the composition of concrete, design and construction methods." *Structural Lightweight aggregate concrete performance, ACI SP-136*. 295-318.
- Vieira, M.G. 2003. "etões de elevado desempenho com agregados leves. Durabilidade e microestrutura." *Tese de Mestrado, LNEC*.
- Wang, F., S. Hu, Q. Ding, e Y. Peng J. 2005. "Influence of mineral admixtures on the permeability of lightweight aggregate concrete." 20: 115–118.
- Wasserman, R., e A. Bentur. 1996. " Interfacial Interactions in Lightweight Aggregate Concretes and their Influence on the Concrete Strength." *Cement & Concrete Composites* 18: 67-76.
- Yang, C.C. 2006. "On the relationship between pore structure and chloride diffusivity from accelerated chloride migration test in cement-based materials." *Cem. Concr. Res.* 36: 1304-1311.
- Yoo, Jaekang, Bohwan Oh, Sangjoon Park, e Seongwoon Kim. 2010. "Chloride penetration resistance properties of concrete containing mineral admixtures." *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures* 1008-1016.

- Youm, Kwang-Soo, Jiho Moon, Jae-Young Choc, e Jung J. Kim. 2016. "Experimental study on strength and durability of lightweight aggregate concrete containing silica fume." *Construction and Building Materials* 114: 517-527 .
- Yu, Hui, Xianming Shi, William H. Hartt, e Baotong Lu. 2010. "Laboratory investigation of reinforcement corrosion initiation and chloride threshold content for self-compacting concrete." *Cement and Concrete Research*.
- Yu, Zhuqing, e Guang Ye. 2013. "The pore structure of cement paste blended with fly ash." *Construction And Building Materials* 45: 30–35.
- Yuan, Qiang, Caijun Shi, Geert De Schutter, Katrien Audenaert, e Dehua Deng. 2009. "Chloride binding of cement-based materials subjected to external chloride environment – A review." *Construction and Building Materials*.
- Zhang, M. H., e O. E. Gjørv. 1991c. "Permeability of high strength lightweight concrete." *ACI Materials Journal* 88: 463–469.
- Zhang, Min-Hong, e Odd E. Gjørv. 1991b. "Effect of silica fume on pore structure and chloride diffusivity of low porosity cement pastes." *Cement and Concrete Research* 21: 1006-1014.
- Zhang, Min-Hong, e Odd E. Gjørv. 1989. "Microstructure Of The Interfacial Zone Between Lightweight Aggregate And Cement Paste." *Cement And Concrete Research* 10: 610-618.
- Zhang, T., e Odd E. Gjørv. 1995. "Effect of ionic interaction in migration testing of chloride diffusivity in concrete." *Cement and Concrete Research* 25: 1535-1542.
- Zhang, Tiewei, e Odd E. Gjørv. 1996. "Diffusion Behavior Of Chloride Ions In Concrete." *Cement and Concrete Research*,.

Anexos

Anexo A. Ficha técnica Cimento Portland

CEM I 42,5R Cimento Portland



Locais de Produção

Fábrica Secil-Outão
Fábrica Maceira-Liz

Embalagem

Granel
Sacos de 40kg

Certificação

Cimento certificado segundo a NP EN 197-1.
Certificados de Conformidade 0856-CPD-0118 e 0856-CPD-0124.

Composição do Produto (Núcleo Cimento)

95% a 100% Clínquer Portland
0% a 5% Outros Constituintes

Principais Aplicações

O Cimento Portland CEM I 42,5R é um produto de elevada qualidade e performance muito utilizado em obras de engenharia civil e na fabricação de betões de elevada a muito elevada resistência. É também particularmente adaptado aos trabalhos onde se exige uma resistência muito elevada aos primeiros dias após aplicação.

As principais aplicações deste cimento são:

- betão pronto ou fabricado em obra de elevada e muito elevada resistência inicial ou final;
- betões leves de elevada resistência;
- betão com aplicação de pré-esforço a idades jovens;
- betão aplicado em tempo frio;
- prefabricação ligeira preesforçada e pesada com alta rotatividade de moldes e pistas;
- caldas de selagem e injeção.

Principais Características

Cimento de cor cinzenta, com elevado calor de hidratação.

Desenvolvimento rápido de resistências (resistência inicial elevada).

Resistências finais dentro dos valores da classe indicada (resistências aos 28 dias).

Advertências Específicas

O correcto desenvolvimento de resistências é muito sensível ao processo de cura.

- devem tomar-se cuidados para evitar a dissecação de todas as peças betonadas;
- devem evitar-se betonagens em tempo muito quente.

Este cimento permite a fabricação de betões de elevado desempenho mecânico, recomendando-se o estudo prévio de composições para obter a melhor performance.

A utilização deste cimento é compatível com a introdução de adições de hidraulicidade latente e é usual a utilização de adjuvantes para melhoria da trabalhabilidade com eventual redução da relação água/cimento.

Informação de Segurança

O manuseamento do cimento em pó pode causar irritação dos olhos e vias respiratórias. Quando misturado com água pode ainda causar sensibilização da pele. Aconselha-se o uso de máscara anti-poeiras para protecção respiratória, luvas de protecção das mãos, óculos de protecção dos olhos e fato de trabalho para protecção da pele.

Para informação detalhada consulte a Ficha de Dados de Segurança deste produto.

Última actualização

Setembro 2004 - Versão 3

pag. 1 | 2

Características Químicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado (1)
Perda ao Fogo	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Resíduo Insolúvel	NP EN 196-2	≤ 5,0%
Teor de Sulfatos (em SO ₃)	NP EN 196-2	≤ 4,0%
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	≤ 0,10%

(1) As percentagens são referidas à massa de cimento.

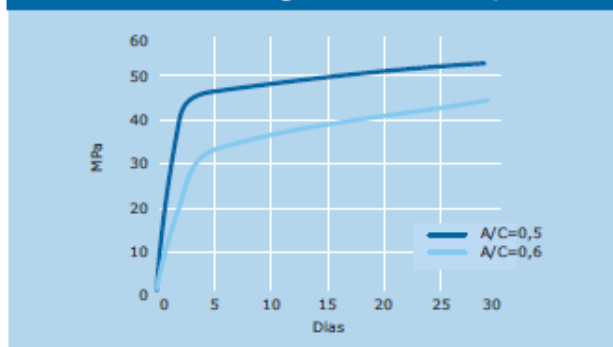
Características Mecânicas

Resistência à Compressão (MPa)			
Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência	NP EN 196-1
2 dias	7 dias	28 dias	
≥20	-	≥ 42,5 e ≤ 62,5	

Características Físicas

Propriedades	Método de Ensaio	Valor Especificado
Princípio de Presa	NP EN 196-3	≥ 60 min
Expansibilidade	NP EN 196-3	≤ 10 mm

Valores médios indicativos da resistência à compressão de betão fabricado com 350 Kg/m³ de cimento CEM I 42,5R



Autoestrada A2,
Ponte de Alcácer do Sal.



Companhia Geral de Cal e Cimento, S.A.

Direção Comercial
Av. das Forças Armadas, 125 6º
1600-079 LISBOA
Tel. 217 927 100 . Fax. 217 936 200

Vendas Norte
Tel. 226 078 410 . Fax. 226 078 411

Vendas Centro
Tel. 244 779 500 . Fax. 244 777 455

Vendas Sul
Tel. 212 198 280 . Fax. 212 198 229

Cimento Branco
Tel. 244 587 700 . Fax. 244 589 652

Departamento Técnico-Comercial
Tel. 212 198 280 . Fax. 212 198 229

E-mail - comercial@secil.pt
Site - www.secil.pt

Anexo B. Ficha técnica superplastificante



The Chemical Company

MasterGlenium SKY 548

Antes: GLENIUM SKY 548

Superplastificante de éter policarboxílico para produção de betão de elevada performance com especial relevância sobre as resistências iniciais.

DESCRIÇÃO

MasterGlenium SKY 548 é um superplastificante inovador de última geração, à base de polímeros de éter policarboxílico (PCE). A configuração especial das suas moléculas permite uma eficaz hidratação do cimento. A adsorção da molécula às partículas de cimento, combinada com um eficaz efeito de dispersão, expõe uma maior superfície dos grânulos de cimento para reagirem com a água. Como resultado deste efeito, é possível obter um processo de hidratação mais eficaz e consequentemente melhor comportamento nas resistências iniciais.

A estrutura do polímero do MasterGlenium SKY 548 foi especialmente desenvolvida para melhorar a reologia do betão para aplicações em pré ou pós-esforço, revestimento definitivo de túneis, ou em qualquer processo que se pretenda uma descofragem relativamente rápida, obtendo betões de elevada fluidez e baixa viscosidade mesmo a baixas relações a/c sem risco de pegajosidade. Robustez é o distinto benefício do betão produzido com MasterGlenium SKY 548. MasterGlenium SKY 548 é livre de cloratos, reúne os requisitos NP EN-934-2 e é compatível com todos os tipos de cimento.

RENDIMENTO / DOSAGEM

A dosagem normalmente recomendada situa-se entre 0,5 e 1,5 litros por 100 Kg de ligante e outros materiais (finos ou fillers) inferiores a 0,125 mm utilizados para produção de betão rheodinâmico. Outras dosagens podem ser utilizadas em situações especiais de acordo com as condições específicas de cada obra. Nestes casos consultar o nosso Departamento Técnico.

EMBALAGEM E ARMAZENAMENTO

MasterGlenium SKY 548 é fornecido em depósitos de 1000 kg e a granel. Armazenar em local a temperaturas não inferiores a 5° C. Se congelar, o produto deverá ser aquecido até pelo menos 30° C, e misturado adequadamente.

CAMPOS DE APLICAÇÃO

MasterGlenium SKY 548 pode ser utilizado em combinação com adjuvantes MasterCast 820 MA ou MasterCast, produzindo betão

rheodinâmico, auto-compactável, mesmo na presença de grande densidade de amaduras, sem necessidade de vibração. MasterGlenium SKY 548 permite obter uma forte plastificação e um desenvolvimento rápido das resistências mecânicas.

A utilização do MasterGlenium SKY 548 deverá ter em particular atenção a temperatura ambiente. É aconselhável a utilização de um produto de gama MasterPozzolith em sinergia por forma a garantir o tempo de trabalhabilidade desejado, sem comprometer a sua principal característica para contribuição melhorada às idades iniciais.

VANTAGENS

MasterGlenium SKY 548 proporciona os seguintes benefícios à indústria de produção de betão:

- Produção de betão rheoplástico e rheodinâmico com uma menor relação a/c.
- Optimização dos ciclos de obra reduzindo a sua duração.
- Aumento da produtividade.
- Melhoria da aparência superficial.
- Melhora a reologia do betão, minimizando a sua pegajosidade.
- Assegura robustez e consistência na qualidade do betão produzido.
- Comparativamente aos superplastificantes tradicionais, as propriedades tais como resistências iniciais e finais, à flexão e compressão, aderência ao aço, módulo de elasticidade, retração, segregação e impermeabilidade são melhoradas.

MODO DE APLICAÇÃO

MasterGlenium SKY 548 é um adjuvante líquido pronto a usar que deve ser adicionado ao betão durante a mistura. Os melhores resultados são obtidos quando o adjuvante é adicionado após todos os restantes componentes e após a adição de pelo menos 80% do total de água de mistura. Evitar a adição do adjuvante aos materiais secos. Misturar durante pelo menos 60 segundos, depois da introdução do MasterGlenium SKY 548 por forma a obter uma dispersão homogênea.

Continuar a mistura e ajustar a quantidade de água para obter a trabalhabilidade requerida.

MasterGlenium SKY 548
Página 1 de 3
Edição: 01/02/2014

MASTER®
>>BUILDERS
SOLUTIONS

MasterGlenium SKY 548

Antes: GLENIUM SKY 548

Superplastificante de éter policarboxílico para produção de betão de elevada performance com especial relevância sobre as resistências iniciais.

COMPATIBILIDADE

MasterGlenium SKY 548 é compatível e recomendado para utilização com:

MasterMatrix para produção de Smart Dynamic Concrete;
MasterCast 820 MA, adjuvantes para produção de betão reodinâmico;

MICRO-AIR adjuvante introdutor de ar, para melhorar a resistência aos ciclos de gelo-degelo (classe de exposição XF 1 a XF 4, EN 206 – 1);


MasterRoc MS 610, microsílca para betão de maiores performances e de maior durabilidade em ambientes quimicamente agressivos (classe de exposição XA 1 a XA 3, EN 206 – 1);

Agente desmoldante MasterFinish para remoção de co-fragens e para melhorar acabamentos arquitectónicos.

MasterGlenium SKY 548 não é compatível com os superplastificantes MasterRheobuild.

Propriedades	
Função principal:	Superplastificante / Redutor de água de alta actividade
Função secundária:	Acelerador de endurecimento
Efeitos secundários:	Risco de segregação com sobredosagem
Marcação CE:	Segundo EN 934-2 como T3.1 , T3.2 e T7
Aspecto:	Líquido turvo ligeiramente amarelado
Densidade relativa (20°C):	1,038 ± 0,02 g/cm ³
pH:	5,5 ± 1
Viscosidade Brookfield (20°C):	< 70 cps
Teor em iões cloreto:	< 0,1%

Os dados técnicos aqui apresentados são fruto de resultados estatísticos. Caso se pretendam valores de controlo, podem ser solicitados ao nosso Departamento Técnico.

 MARCAÇÃO CE DE PRODUTO SOB A
DIRECTIVA UE DE PRODUTOS DE
CONSTRUÇÃO DA UNIÃO EUROPEIA

Anexo C. Ensaios de abaixamento, massa volúmica e resistência à compressão

Quadro C.1 - Resultados obtidos nos ensaios de abaixamento do cone de Abrams, massa volúmica (estado fresco e endurecido) e resistência à compressão

a/l	Agregado	a/c	Referência	Ligante	Adição	Adjuvante (g)	Abaix. (cm)	ρ_{fresca} (kg/m ³)	ρ_{seco} (kg/m ³)	$f_{cm,28d}$ (MPa)	CV (%)	$f_{cm,90d}$ (MPa)	CV (%)	$f_{c,28d}/\rho_s$ (x10 ³ m)	$f_{c,90d}/\rho_s$ (x10 ³ m)
0,35	Natural	0,35	B35I	CEM I	0%	135	13,2	2450	2334	76,99	1,9	79,78	2,5	3,3	3,4
		0,37	B35IIAD	CEM II/A-D	6% SF	170	10,5	2390	2292	78,04	7,9	82,68	4,9	3,4	3,6
		0,41	B35IIAV	CEM II/A-V	15% Cz	113	14,5	2380	2300	63,18	0,7	78,32	1,1	2,7	3,4
		0,50	B35IIBV	CEM II/B-V	30% Cz	113	13	2330	2274	55,98	1,6	71,64	0,6	2,5	3,2
		0,41	B35IIAL	CEM II/A-L	15% FC	135	10,5	2410	2308	61,98	3,6	69,82	3,2	2,7	3,0
		0,50	B35IIBL	CEM II/B-L	30% FC	180	15	2400	2282	53,21	1,0	57,46	2,9	2,3	2,5
	Stalite	0,35	S35I	CEM I	0%	113	12	1940	1921	66,13	2,5	71,54	1,0	3,4	3,7
	Leca	0,35	L35I	CEM I	0%	30	10	1910	1659	35,93	2,1	38,45	5,0	2,2	2,3
0,45	Natural	0,45	B45I	CEM I	0%	40	13,5	2390	2268	58,05	5,4	62,27	3,8	2,6	2,7
		0,48	B45IIAD	CEM II/A-D	6% SF	48	12,5	2360	2220	51,48	0,2	59,68	2,6	2,3	2,7
		0,53	B45IIAV	CEM II/A-V	15% Cz	30	14,6	2380	2250	49,64	1,0	63,46	1,2	2,2	2,8
		0,64	B45IIBV	CEM II/B-V	30% Cz	20	14,4	2370	2249	44,58	1,8	62,88	2,0	2,0	2,8
		0,53	B45IIAL	CEM II/A-L	15% FC	35	14,1	2370	2258	52,31	3,4	53,32	1,0	2,3	2,4
		0,64	B45IIBL	CEM II/B-L	30% FC	65	14,2	2360	2236	40,76	1,8	43,60	2,0	1,8	2,9
	Stalite	0,45	S45I	CEM I	0%	30	13	1940	1825	51,14	0,7	55,44	4,5	2,8	3,0
	Leca	0,45	L45I	CEM I	0%	20	12	1870	1622	30,27	3,8	34,61	2,2	1,9	2,1
0,55	Natural	0,55	B55I	CEM I	0%	0	15,8	2340	2227	47,67	1,0	53,08	0,9	2,1	2,4
		0,59	B55IIAD	CEM II/A-D	6% SF	0	13,4	2330	2199	44,53	3,7	50,93	1,9	2,0	2,3
		0,65	B45IIAV	CEM II/A-V	15% Cz	0	18,8	2350	2232	38,63	1,4	52,14	1,4	1,7	2,3
		0,79	B55IIBV	CEM II/B-V	30% Cz	0	19,2	2360	2205	30,69	1,3	46,06	2,1	1,4	2,1
		0,65	B55IIAL	CEM II/A-L	15% FC	0	16	2340	2232	40,76	0,9	42,39	0,7	1,8	1,9
		0,79	B55IIBL	CEM II/B-L	30% FC	0	14	2330	2228	29,95	0,7	30,94	1,4	1,3	1,4
	Stalite	0,55	S55I	CEM I	0%	0	13,8	1930	1799	41,13	1,4	46,04	2,0	2,3	2,6
	Leca	0,55	L55I	CEM I	0%	0	14	1830	1599	26,09	2,9	29,64	2,6	1,6	1,9

Anexo D. Ensaio acelerado de migração

Quadro D.1 – Valores obtidos no ensaio acelerado de migração (Provetes do tipo CEM I e CEM II/A-D)

Referência	esp. mm	I _{30V} mA	U V	I _{ajust} mA	T _i °C	Duração horas	I _f mA	T _f °C	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X _{med} mm	T _{med} °C	D ₀ x10 ⁻¹² m ² /s
B35I	48,85	46,67	30	46,67	17,60	24	53,33	21,50	21,41	26,58	21,17	23,35	24,29	19,61	20,24	22,38	19,55	10,08
	48,34	46,67	30	46,67	17,60	24	53,33	21,50	18,98	17,88	21,61	21,74	22,74	21,40	20,30	20,66	19,55	9,17
	47,54	46,67	30	46,67	17,60	24	53,33	21,50	25,92	25,29	22,66	22,50	20,46	27,75	24,78	24,19	19,55	10,67
B45I	49,49	33,33	30	33,33	18,00	23	50,00	21,20	35,78	33,00	37,06	35,12	31,56	30,60	29,98	33,30	19,60	15,98
	48,27	33,33	30	33,33	18,00	23	50,00	21,20	30,66	29,93	29,74	29,01	28,80	28,79	26,34	29,04	19,60	13,51
	50,89	33,33	30	33,33	18,00	23	50,00	21,20	26,83	28,07	27,78	28,53	28,49	26,81	26,54	27,58	19,60	13,45
B55I	46,66	63,33	25	50,00	16,10	24	63,33	20,60	35,64	32,35	31,39	27,35	31,11	29,77	35,41	31,86	18,35	16,83
	59,34	63,33	25	50,00	16,10	24	63,33	20,60	27,44	25,41	26,29	26,11	25,39	27,89	30,09	26,94	18,35	17,63
	52,14	63,33	25	50,00	16,10	24	63,33	20,60	28,07	25,41	27,27	26,00	30,71	28,16	31,91	28,22	18,35	16,42
B35IIAD	47,53	23,33	30	23,33	17,60	24	26,67	20,40	13,35	10,19	10,39	15,73	14,31	13,93	20,33	14,03	19,00	5,94
	47,80	23,33	30	23,33	17,60	24	26,67	20,40	16,35	10,16	12,24	10,60	12,14	14,78	21,50	13,97	19,00	5,95
	48,79	23,33	30	23,33	17,60	24	26,67	20,40	10,10	10,45	9,69	9,47	10,53	10,49	10,78	10,21	19,00	4,31
B45IIAD	48,24	56,67	30	56,67	18,10	23	70,00	22,20	22,35	17,34	17,59	17,42	19,65	23,18	19,34	19,55	20,15	8,89
	48,51	56,67	30	56,67	18,10	23	70,00	22,20	21,59	19,79	20,04	19,08	21,26	18,82	20,22	20,11	20,15	9,21
	51,50	56,67	30	56,67	18,10	23	70,00	22,20	18,77	16,08	17,76	19,59	19,78	18,21	20,16	18,62	20,15	8,96
B55IIAD	51,34	46,67	30	46,67	16,30	24	66,67	21,20	31,86	29,30	25,83	27,37	26,06	28,32	35,43	29,17	18,75	13,95
	51,96	46,67	30	46,67	16,30	24	66,67	21,20	30,46	29,65	29,72	29,87	31,65	26,80	29,84	29,71	18,75	14,39
	48,75	46,67	30	46,67	16,30	24	66,67	21,20	31,63	32,64	32,33	29,58	29,86	29,40	33,04	31,21	18,75	14,27

Quadro D.2 - Valores obtidos no ensaio acelerado de migração (Provetes do tipo CEM II/A-V e CEM II/B-V)

Referência	esp.	I_{30V}	U	I_{ajust}	T_i	Duração	I_f	T_f	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_{med}	T_{med}	D_0
	mm	mA	V	mA	°C		mA	°C										
B35IIAV	51,04	43,33	30	43,33	18,20	24	43,33	21,80	21,80	20,40	17,86	18,08	18,33	21,49	24,50	20,35	20,00	9,50
	50,35	43,33	30	43,33	18,20	24	43,33	21,80	22,34	19,37	20,04	20,97	21,75	22,25	25,92	21,80	20,00	10,10
	50,00	43,33	30	43,33	18,20	24	43,33	21,80	21,81	21,08	21,69	21,23	19,82	19,75	21,06	20,92	20,00	9,60
B45IIAV	51,67	63,33	25	53,33	18,20	23	70,00	22,70	31,60	32,54	30,89	34,20	26,73	27,35	31,87	30,74	20,45	18,60
	46,56	63,33	25	53,33	18,20	23	70,00	22,70	35,78	29,65	30,36	27,97	27,65	28,44	30,57	30,06	20,45	16,47
	48,22	63,33	25	53,33	18,20	23	70,00	22,70	30,10	28,52	26,78	26,94	23,00	26,88	25,38	26,80	20,45	15,07
B55IIAV	50,70	66,67	20	43,33	18,20	24	63,33	20,10	36,76	32,67	31,78	32,52	33,27	31,84	34,75	33,37	19,15	24,11
	50,31	66,67	20	43,33	18,20	24	63,33	20,10	33,15	30,70	30,80	30,79	33,17	30,62	38,56	32,54	19,15	23,30
	49,66	66,67	20	43,33	18,20	24	63,33	20,10	30,19	34,74	31,19	32,54	32,29	30,57	32,48	32,00	19,15	22,61
B35IIBV	51,41	60,00	25	50,00	18,70	23	66,67	22,20	33,88	28,84	29,38	29,12	28,95	30,80	34,82	30,83	20,45	18,57
	48,61	60,00	25	50,00	18,70	23	66,67	22,20	33,65	31,59	30,23	27,92	29,12	30,34	34,34	31,02	20,45	17,74
	51,56	60,00	25	50,00	18,70	23	66,67	22,20	31,65	28,56	28,23	30,77	28,52	35,69	39,00	31,77	20,45	19,23
B45IIBV	46,91	73,33	20	50,00	23,20	24	56,67	24,20	32,80	34,88	32,68	29,76	29,09	27,28	26,51	30,43	23,70	20,62
	46,14	73,33	20	50,00	23,20	24	56,67	24,20	31,83	36,48	35,69	34,06	33,55	33,93	34,26	34,25	23,70	23,03
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B55IIBV	48,70	80,00	20	53,33	17,80	24	63,33	20,10	36,24	33,64	31,85	32,71	32,92	33,70	35,79	33,83	18,95	23,55
	50,80	80,00	20	53,33	17,80	24	63,33	20,10	43,37	36,46	35,37	35,59	38,62	35,39	33,29	36,87	18,95	26,85
	49,65	80,00	20	53,33	17,80	24	63,33	20,10	35,89	34,92	32,17	33,79	33,29	38,56	40,19	35,54	18,95	25,27

Quadro D.3 - Valores obtidos no ensaio acelerado de migração (Provetes do tipo CEM II/A-L e CEM II/B-L)

Referência	esp. mm	I _{30V} mA	U V	I _{ajust} mA	T _i °C	Duração horas	I _f mA	T _f °C	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X _{med} mm	T _{med} °C	D ₀ x10 ⁻¹² m ² /s
B35IIAL	49,35	43,33	30	43,33	17,80	24	56,67	22,50	25,18	27,97	27,09	24,98	27,78	26,43	25,72	26,45	20,15	12,18
	51,63	43,33	30	43,33	17,80	24	56,67	22,50	27,61	24,93	24,78	26,61	26,37	24,01	27,76	26,01	20,15	12,48
	49,01	43,33	30	43,33	17,80	24	56,67	22,50	25,97	25,32	25,32	25,02	25,11	23,23	25,39	25,05	20,15	11,42
B45IIAL	52,25	66,67	25	53,33	17,70	24	73,33	23,40	33,58	30,71	29,09	27,05	28,61	34,53	31,32	30,70	20,55	18,12
	49,15	66,67	25	53,33	17,70	24	73,33	23,40	37,78	35,20	30,01	32,68	35,29	34,97	36,85	34,68	20,55	19,47
	45,94	66,67	25	53,33	17,70	24	73,33	23,40	35,99	34,70	35,81	35,76	34,38	32,50	36,20	35,05	20,55	18,47
B55IIAL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B35IIBL	47,84	43,33	30	43,33	18,10	24	53,33	22,50	33,39	30,88	31,66	34,96	34,49	31,42	35,46	33,18	20,30	15,02
	50,40	43,33	30	43,33	18,10	24	53,33	22,50	32,53	31,43	35,18	33,64	32,42	30,80	30,49	32,35	20,30	15,37
	48,18	43,33	30	43,33	18,10	24	53,33	22,50	31,45	31,30	32,95	36,15	33,50	32,41	32,02	32,82	20,30	14,95
B45IIBL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B55IIBL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Quadro D.4 - Valores obtidos no ensaio acelerado de migração (Provetes do tipo CEM I com AL Leca e Stalite)

Referência	esp. mm	I _{30V} mA	U V	I _{ajust} mA	T _i °C	Duração horas	I _f mA	T _f °C	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X _{med} mm	T _{med} °C	D ₀ x10 ⁻¹² m ² /s
L35I	44,71	70,00	20	46,67	16,70	24	46,67	20,20	19,65	18,79	20,21	20,43	19,65	18,84	17,10	19,24	18,45	11,84
	46,48	70,00	20	46,67	16,70	24	46,67	20,20	16,64	17,62	20,21	18,56	21,02	17,87	16,48	18,34	18,45	11,65
	45,61	70,00	20	46,67	16,70	24	46,67	20,20	20,21	21,30	20,67	20,82	20,15	18,39	18,11	19,95	18,45	12,55
L45I	46,33	76,67	20	46,67	16,70	24	46,67	20,20	19,17	20,45	24,39	23,61	24,14	23,48	20,80	22,29	18,45	14,35
	46,76	76,67	20	46,67	16,70	24	46,67	20,20	20,89	20,45	22,16	23,31	20,17	19,66	19,40	20,86	18,45	13,47
	45,03	76,67	20	46,67	16,70	24	46,67	20,20	21,89	19,72	19,90	19,80	21,42	24,78	19,57	21,01	18,45	13,12
L55I	46,33	90,00	15	43,33	18,70	24	50,00	19,70	22,05	19,71	23,00	20,89	21,00	22,70	23,34	21,81	19,20	18,90
	46,30	90,00	15	43,33	18,70	24	50,00	19,70	21,83	20,75	21,31	23,13	22,30	23,42	20,67	21,91	19,20	18,98
	45,14	90,00	15	43,33	18,70	24	50,00	19,70	24,14	27,08	23,33	22,33	24,45	23,47	23,46	24,03	19,20	20,53
S35I	47,02	53,33	25	43,33	16,40	24	46,67	20,10	21,15	18,37	18,56	22,74	22,72	20,99	21,76	20,90	18,25	10,82
	46,77	53,33	25	43,33	16,40	24	46,67	20,10	17,96	19,46	20,78	20,54	22,33	21,09	18,64	20,11	18,25	10,33
	43,70	53,33	25	43,33	16,40	24	46,67	20,10	20,70	23,65	22,65	22,03	22,10	22,87	20,26	22,04	18,25	10,69
S45I	47,09	56,67	25	46,67	16,60	24	53,33	20,20	22,81	19,02	21,97	26,12	27,85	24,90	19,97	23,23	18,40	12,14
	45,37	56,67	25	46,67	16,60	24	53,33	20,20	21,23	23,84	27,85	25,90	20,69	22,18	24,62	23,76	18,40	12,01
	45,25	56,67	25	46,67	16,60	24	53,33	20,20	18,76	21,72	23,84	24,92	24,75	23,43	20,26	22,52	18,40	11,31
S55I	44,15	73,33	20	56,67	18,70	24	56,67	20,20	30,08	30,19	27,10	27,44	27,95	26,20	24,78	27,67	19,45	17,37
	47,82	73,33	20	56,67	18,70	24	56,67	20,20	26,85	24,23	23,57	26,48	24,15	23,36	25,69	24,90	19,45	16,70
	44,94	73,33	20	56,67	18,70	24	56,67	20,20	20,63	22,71	24,10	23,70	23,92	21,44	26,83	23,33	19,45	14,70

Anexo E. Ensaio de Imersão

Quadro E.1 – Valores obtidos através do método potenciométrico (Ensaio de imersão). BAN com relação a/l de 0,35

Referência	Distâncias (mm)	Potencial (mV)	Média (mV)	Concentração Cl- (ppm)	Concentração Cl- (% massa amostra)	Referência	Distâncias (mm)	Potencial (mV)	Média (mV)	Concentração Cl- (ppm)	Concentração Cl- (% massa amostra)
B35I	0	126,10	126,05	3160,98	0,316	B35IIBV	0	121,60	118,35	4469,97	0,4470
	5	126,00					5,5	115,10			
	5	150,30	150,00	1075,87	0,108		5,5	170,50	170,00	529,13	0,0529
	10	149,70					11	169,50			
	10	176,40	176,40	355,83	0,036		11	164,50	163,05	598,03	0,0598
	15	176,40					15	161,60			
	15	183,30	182,40	253,31	0,025		15	179,30	181,20	269,94	0,0270
	20	181,50					20	183,10			
20	181,10	180,60	278,66	0,028	20	181,50	181,90	260,11	0,0260		
26	180,10				25	182,30					
26	176,10	177,20	333,69	0,033	25	185,10	176,50	353,63	0,0354		
30	178,30				30	167,90					
B35IIAD	0	134,40	135,30	2084,72	0,208	B35IIAL	0	126,30	125,90	3182,39	0,318
	5	136,20					6	125,50			
	5	168,20	168,50	467,96	0,047		6	142,00	142,30	1521,40	0,152
	10	168,80					10	142,60			
	10	184,40	184,95	221,29	0,022		10	169,30	171,40	485,14	0,049
	15	185,50					15	173,50			
	15	189,40	187,70	191,27	0,019		15	176,80	172,95	440,69	0,044
	20	186,00					20	169,10			
20	186,30	186,25	206,55	0,021	20	166,80	168,35	471,13	0,047		
25	186,20				25,5	169,90					
25	186,70	186,65	202,22	0,020	25,5	181,10	179,40	296,96	0,030		
30	186,60				32	177,70					
B35IIAV	0	121,30	123,05	3617,86	0,362	B35IIBL	0	125,60	126,00	3168,10	0,317
	5	124,80					5	126,40			
	5	159,80	159,55	700,04	0,070		5	133,40	133,35	2275,92	0,228
	10	159,30					10	133,30			
	10	174,50	175,00	388,09	0,039		10	145,10	145,65	1308,50	0,131
	15	175,50					15,5	146,20			
	15	160,40	165,30	540,44	0,054		15,5	157,20	157,15	779,88	0,078
	20	170,20					20	157,10			
20	165,00	169,90	532,43	0,053	20	154,80	156,05	819,45	0,082		
25,5	174,80				25	157,30					
25,5	176,80	174,25	406,56	0,041	25	161,90	163,30	591,34	0,059		
30	171,70				30	164,70					

Quadro E.2 - Valores obtidos através do método potenciométrico (Ensaio de imersão). BAN com relação a/l de 0,45

Referência	Distâncias (mm)	Potencial (mV)	Média (mV)	Concentração Cl- (ppm)	Concentração Cl- (% massa amostra)	Referência	Distâncias (mm)	Potencial (mV)	Média (mV)	Concentração Cl- (ppm)	Concentração Cl- (% massa amostra)
B45I	0	121,60	123,55	3179,34	0,3179	B45IIBV	0	116,80	116,65	4307,14	0,4307
	6	125,50					5,5	116,50			
	6	140,50	140,20	1528,18	0,1528		5,5	158,10	156,75	737,77	0,0738
	10	139,90					10	155,40			
	10	156,00	157,35	718,55	0,0719		10	175,00	173,35	243,40	0,0243
	15	158,70					15,5	171,70			
	15	177,30	179,30	229,07	0,0229		15,5	176,40	179,25	229,75	0,0230
	20	181,30					20	182,10			
20	183,50	182,45	190,22	0,0190	20	183,60	184,60	167,56	0,0168		
25	181,40				25	185,60					
25	184,40	184,10	172,58	0,0173	25	182,50	182,65	187,99	0,0188		
30	183,80				30,5	182,80					
B45IIAD	0	116,30	116,65	4307,14	0,4307	B45IIAL	0	120,90	120,95	3564,68	0,3565
	5	117,00					5	121,00			
	5	139,20	139,70	1562,17	0,1562		5	145,90	146,45	1160,76	0,1161
	10	140,20					10	147,00			
	10	165,20	163,50	548,19	0,0548		10	151,10	151,15	943,91	0,0944
	16	161,80					15	151,20			
	16	171,80	172,35	255,37	0,0255		15	151,80	152,90	873,96	0,0874
	20	172,90					21,5	154,00			
20	184,10	185,40	159,83	0,0160	21,5	174,00	172,45	254,15	0,0254		
26	186,70				26	170,90					
26	185,70	185,00	163,65	0,0164	26	178,10	176,55	269,42	0,0269		
30	184,30				30,5	175,00					
B45IIAV	0	115,80	116,75	5219,68	0,5220	B45IIBL	0	114,40	114,05	4729,86	0,4730
	5	117,70					5	113,70			
	5	137,00	137,00	1931,18	0,1931		5	130,50	130,75	2268,45	0,2268
	10	137,00					11	131,00			
	10	160,00	159,90	689,10	0,0689		11	129,60	129,25	2423,22	0,2423
	15,5	159,80					15	128,90			
	15,5	181,40	180,25	296,32	0,0296		15	129,70	129,95	2349,72	0,2350
	20	179,10					20	130,20			
20	184,50	185,30	225,60	0,0226	20	142,00	141,60	1407,33	0,1407		
26	186,10				25	141,20					
26	185,30	182,95	256,12	0,0256	25	151,00	152,20	882,76	0,0883		
30	180,60				30	153,40					

Quadro E.3 - Valores obtidos através do método potenciométrico (Ensaio de imersão). BAN com relação a/l de 0,55

Referência	Distâncias (mm)	Potencial (mV)	Média (mV)	Concentração Cl- (ppm)	Concentração Cl- (% massa amostra)	Referência	Distâncias (mm)	Potencial (mV)	Média (mV)	Concentração Cl- (ppm)	Concentração Cl- (% massa amostra)
B55I	0	116,50	116,80	4190,82	0,4191	B55IIBV	0	107,40	109,55	5489,49	0,5489
	6	117,10					5	111,70			
	6	137,10	136,85	1734,46	0,1734		5	138,70	138,10	1641,64	0,1642
	10,5	136,60					10	137,50			
	10,5	146,70	146,45	1136,89	0,1137		10	166,00	165,65	489,15	0,0489
	15	146,20					15	165,30			
	15	163,50	162,95	550,07	0,0550		15	173,30	173,10	357,73	0,0358
	20	162,40					20	172,90			
	20	173,70	173,90	345,91	0,0346		20	187,90	187,55	169,21	0,0169
25,5	174,10	25				187,20					
25,5	178,90	177,75	276,21	0,0276	25	187,70	187,85	166,69	0,0167		
31	176,60				30	188,00					
B55IIAD	0	113,50	112,65	5030,38	0,5030	B55IIAL	0	112,20	113,10	4956,67	0,4957
	5	111,80					5,5	114,00			
	5	129,70	128,40	2515,56	0,2516		5,5	121,00	120,20	3626,74	0,3627
	10	127,10					10,5	119,40			
	10	142,30	142,75	1337,89	0,1338		10,5	132,40	134,00	1976,12	0,1976
	15	143,20					15	135,60			
	15	163,60	162,50	561,07	0,0561		15	141,00	140,35	1494,41	0,1494
	20	161,40					20	139,70			
	20	173,50	173,00	359,23	0,0359		20	142,90	143,20	1318,29	0,1318
25	172,50	25				143,50					
25	181,00	180,80	237,14	0,0237	25	155,50	156,00	750,61	0,0751		
30	180,60				30	156,50					
B55IIAV	0	109,50	108,50	5736,99	0,5737	B55IIBL	0	105,70	107,00	6366,83	0,6367
	5	107,50					5	108,30			
	5	126,90	125,85	2814,25	0,2814		5	110,60	110,35	5587,05	0,5587
	10,5	124,80					10	110,10			
	10,5	137,20	138,95	1581,38	0,1581		10	119,20	119,10	3806,59	0,3807
	15	140,70					15,5	119,00			
	15	158,80	159,15	650,18	0,0650		15,5	120,50	121,60	3410,07	0,3410
	20	159,50					20	122,70			
	20	163,10	164,75	507,99	0,0508		20	126,70	126,50	2748,72	0,2749
25	166,40	25				126,30					
25	170,00	171,70	379,39	0,0379	25	130,70	130,55	2300,06	0,2300		
30	173,40				30	130,40					

Quadro E.4 - Valores obtidos através do método potenciométrico (Ensaio de imersão). BEAL com relação a/l de 0,35, 0,45 e 0,55

Referência	Distâncias (mm)	Potencial (mV)	Média (mV)	Concentração Cl- (ppm)	Concentração Cl- (% massa amostra)	Referência	Distâncias (mm)	Potencial (mV)	Média (mV)	Concentração Cl- (ppm)	Concentração Cl- (% massa amostra)
L35I	0	115,70	115,45	4940,91	0,4941	S35I	0	119,10	118,45	4449,90	0,4450
	5,5	115,20					5	117,80			
	5,5	135,20	135,65	2031,45	0,2031		5	142,70	143,60	1434,95	0,1435
	11	136,10					10,5	144,50			
	11	167,80	167,20	492,48	0,0492		10,5	170,70	170,35	468,61	0,0469
	15,5	166,60					15	170,00			
	15,5	160,10	155,65	842,61	0,0843		15	169,70	169,85	479,27	0,0479
	20	151,20					20	170,00			
	20	171,80	174,20	377,46	0,0377		20	150,70	159,35	706,37	0,0706
25	176,60	25				168,00					
25	175,70	176,35	347,84	0,0348	25	174,70	171,70	440,98	0,0441		
30,5	177,00				30	168,70					
L45I	0	105,30	105,20	6802,04	0,6802	S45I	0	119,30	118,80	3857,17	0,3857
	5,5	105,10					5	118,30			
	5,5	115,70	116,00	4822,78	0,4823		5	137,80	137,15	1720,36	0,1720
	10,5	116,30					10	136,50			
	10,5	133,90	135,25	2067,52	0,2068		10	158,20	154,60	798,30	0,0798
	15	136,60					15	151,00			
	15	146,20	147,15	1224,77	0,1225		15	178,40	175,95	349,93	0,0350
	20	148,10					20	173,50			
	20	176,90	174,25	376,74	0,0377		20	176,90	178,95	272,80	0,0273
25	171,60	25				181,00					
25	180,50	178,30	323,00	0,0323	25	177,50	178,40	280,71	0,0281		
31,5	176,10				30	179,30					
L55I	0	97,70	97,75	9132,61	0,9133	S55I	0	110,10	110,75	5500,57	0,5501
	5,5	97,80					5	111,40			
	5,5	104,70	104,75	6950,76	0,6951		5	126,10	125,80	2834,69	0,2835
	10	104,80					10	125,50			
	10	116,70	116,75	4221,26	0,4221		10	148,30	149,15	1014,64	0,1015
	15	116,80					15,5	150,00			
	15	132,00	131,95	2162,65	0,2163		15,5	165,50	167,25	495,58	0,0496
	20	131,90					21	169,00			
	20	149,30	148,70	1034,93	0,1035		21	179,10	179,10	270,68	0,0271
26	148,10	25				-					
26	161,50	162,30	568,89	0,0569	25	179,80	179,85	260,32	0,0260		
32	163,10				30	179,90					

Quadro E.5 – Concentrações de Cl⁻ obtidas nas várias profundidades analisadas em cada provete

XS2 (Imersão)													
Referência	Concentração Cl ⁻ (em % massa de amostra)							Concentração Cl ⁻ (em % massa de ligante)					
	Inicial	Profundidade (mm)						Profundidade (mm)					
		0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30
B35I	0,016	0,316	0,108	0,036	0,025	0,028	0,033	1,556	0,475	0,102	0,048	0,062	0,090
B35IIAD	0,015	0,208	0,047	0,022	0,019	0,021	0,020	0,954	0,157	0,035	0,020	0,028	0,026
B35IIAV	0,017	0,362	0,070	0,039	0,054	0,053	0,041	1,762	0,271	0,111	0,189	0,185	0,121
B35IIBV	0,008	0,447	0,053	0,060	0,027	0,026	0,035	2,218	0,227	0,262	0,096	0,091	0,138
B35IIAL	0,016	0,318	0,152	0,049	0,044	0,047	0,030	1,550	0,698	0,167	0,144	0,160	0,070
B35IIBL	0,009	0,317	0,228	0,131	0,078	0,082	0,059	1,561	1,109	0,618	0,350	0,370	0,254
B45I	0,016	0,318	0,153	0,072	0,023	0,019	0,017	1,712	0,776	0,317	0,039	0,017	0,007
B45IIAD	0,018	0,431	0,156	0,055	0,026	0,016	0,016	2,291	0,767	0,204	0,042	0	0
B45IIAV	0,018	0,522	0,193	0,069	0,030	0,023	0,026	2,835	0,985	0,286	0,065	0,026	0,043
B45IIBV	0,013	0,431	0,074	0,024	0,023	0,017	0,019	2,348	0,342	0,064	0,056	0,021	0,033
B45IIAL	0,020	0,356	0,116	0,094	0,087	0,025	0,027	1,899	0,542	0,420	0,380	0,031	0,039
B45IIBL	0,029	0,473	0,227	0,242	0,235	0,141	0,088	2,481	1,106	1,192	1,151	0,624	0,331
B55I	0,019	0,419	0,173	0,114	0,055	0,035	0,028	2,546	0,983	0,603	0,229	0,099	0,055
B55IIAD	0,021	0,503	0,252	0,134	0,056	0,036	0,024	3,029	1,449	0,709	0,221	0,094	0,017
B45IIAV	0,020	0,574	0,281	0,158	0,065	0,051	0,038	3,532	1,667	0,881	0,287	0,196	0,114
B55IIBV	0,011	0,549	0,164	0,049	0,036	0,017	0,017	3,389	0,965	0,239	0,156	0,037	0,036
B55IIAL	0,019	0,496	0,363	0,198	0,149	0,132	0,075	3,042	2,193	1,140	0,832	0,720	0,358
B55IIBL	0,024	0,637	0,559	0,381	0,341	0,275	0,230	3,900	3,403	2,270	2,018	1,597	1,311
L35I	0,017	0,494	0,203	0,049	0,084	0,038	0,035	1,759	0,686	0,119	0,248	0,076	0,066
L45I	0,020	0,680	0,482	0,207	0,122	0,038	0,032	2,678	1,875	0,757	0,416	0,072	0,050
L55I	0,019	0,913	0,695	0,422	0,216	0,103	0,057	4,086	3,089	1,842	0,901	0,386	0,173
S35I	0,009	0,445	0,143	0,047	0,048	0,071	0,044	1,861	0,574	0,162	0,166	0,263	0,150
S45I	0,013	0,388	0,172	0,080	0,035	0,027	0,028	1,700	0,725	0,305	0,100	0,065	0,069
S55I	0,012	0,550	0,283	0,101	0,050	0,027	0,026	2,766	1,396	0,460	0,193	0,077	0,072

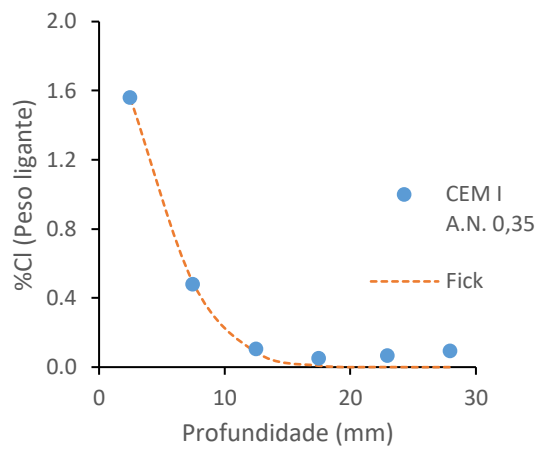


Figura E.1 - Perfil de cloretos (B35I)

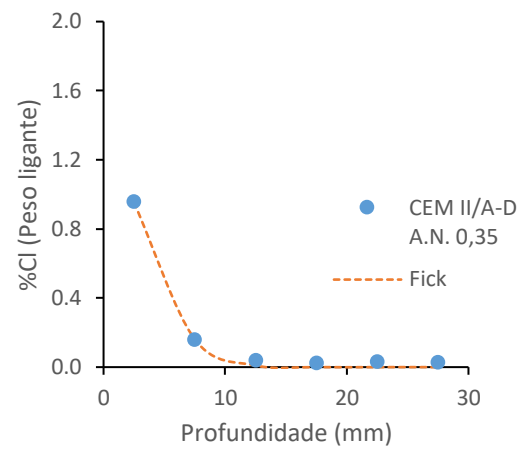


Figura E.2 - Perfil de cloretos (B35IAD)

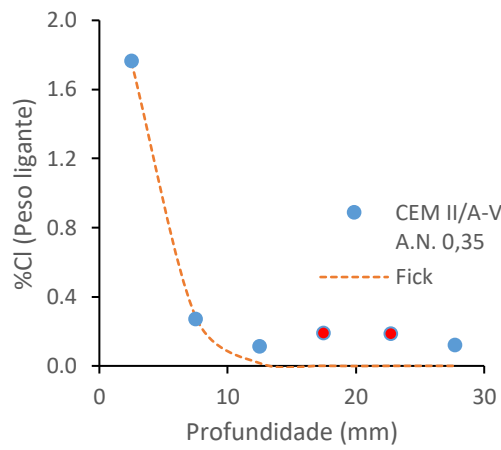


Figura E.3 - Perfil de cloretos (B35IIAV)

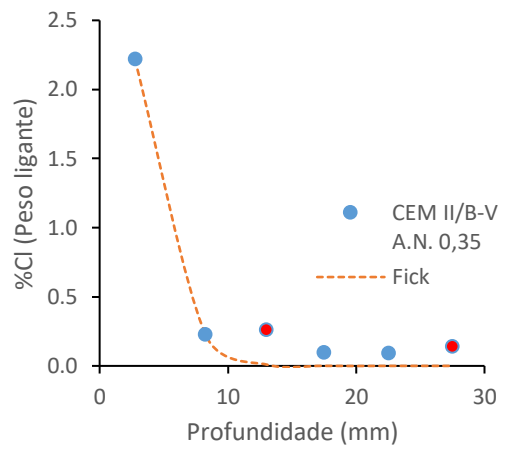


Figura E.4 - Perfil de cloretos (B35IIBV)

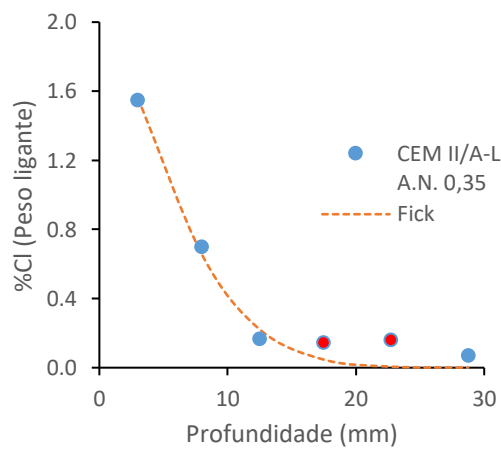


Figura E.5 - Perfil de cloretos (B35IIAL)

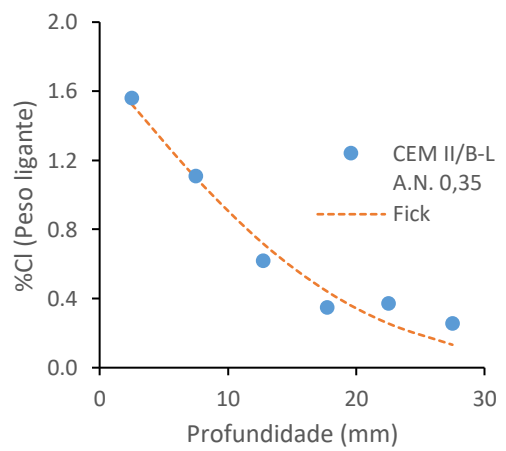


Figura E.6 - Perfil de cloretos (B35IIBL)

● Pontos desprezados na obtenção da curva de Fick

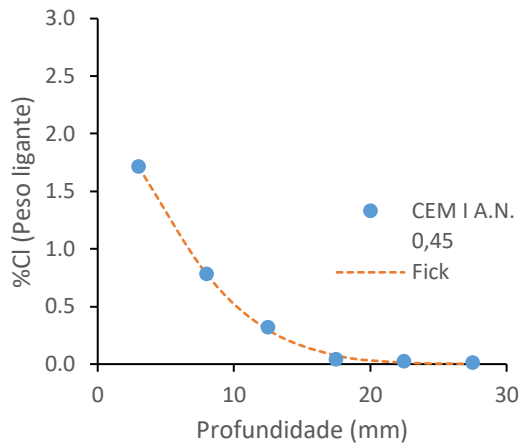


Figura E.7 - Perfil de cloretos (B45I)

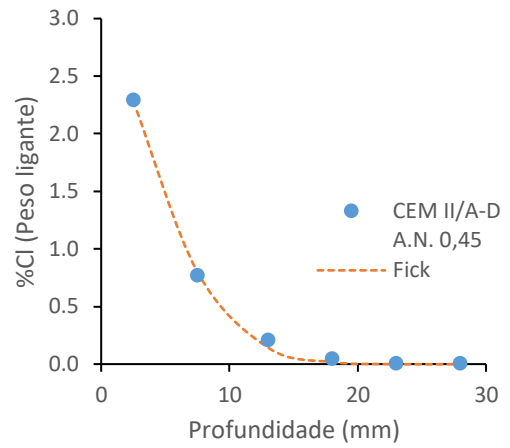


Figura E.8 - Perfil de cloretos (B45IAD)

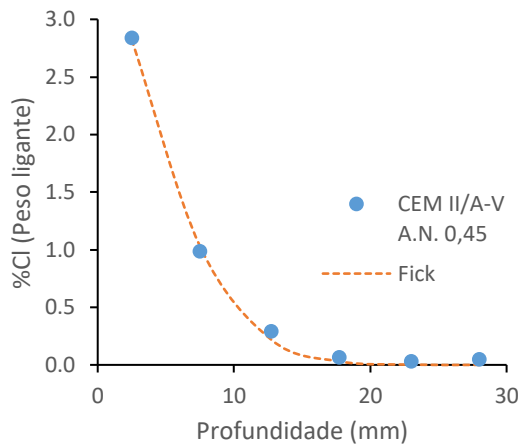


Figura E.9 - Perfil de cloretos (B45IIAV)

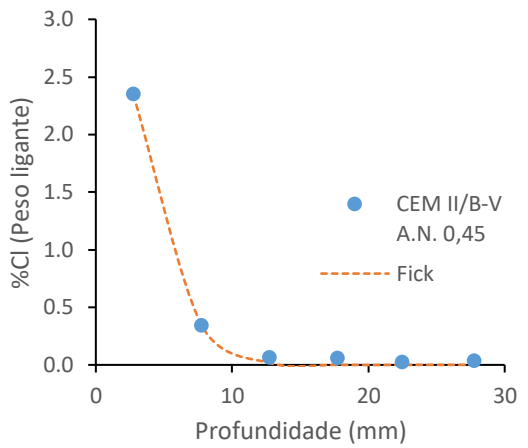


Figura E.10 - Perfil de cloretos (B45IIBV)

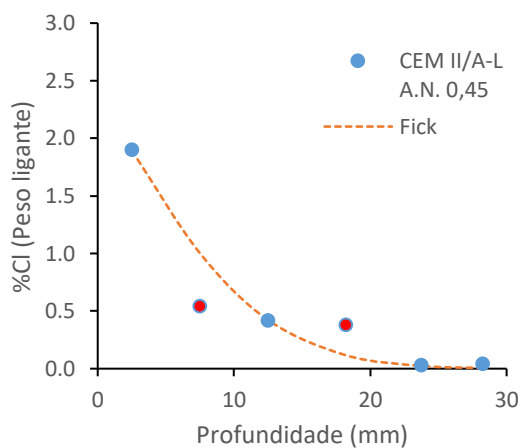


Figura E.11 - Perfil de cloretos (B45IIAL)

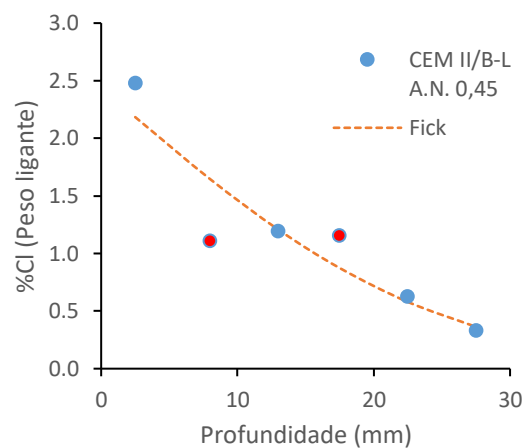


Figura E.12 - Perfil de cloretos (B45IIBL)

● Pontos desprezados na obtenção da curva de Fick

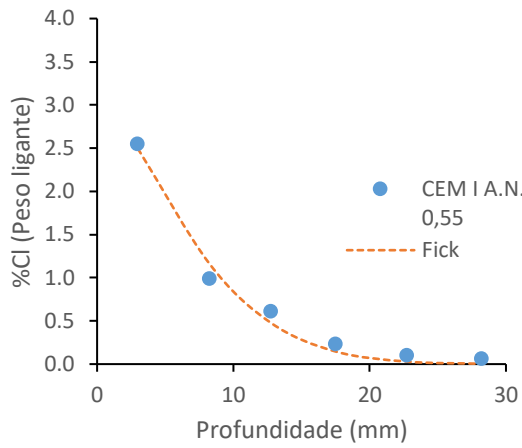


Figura E.13 - Perfil de cloratos (B55I)

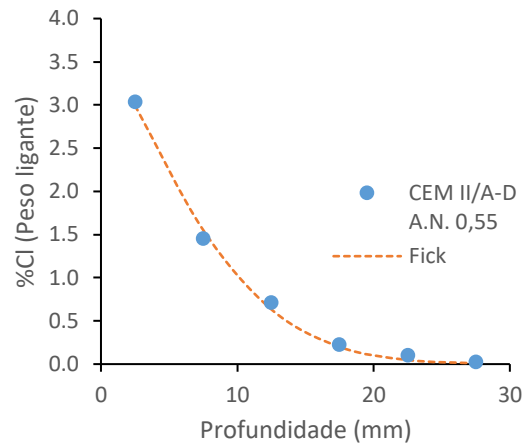


Figura E.14 - Perfil de cloratos (B55IAD)

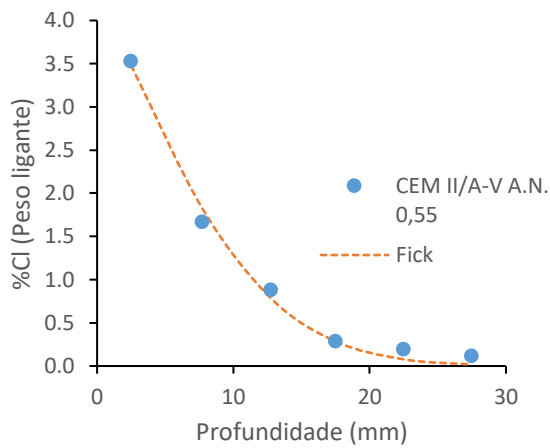


Figura E.15 - Perfil de cloratos (B55IIAV)

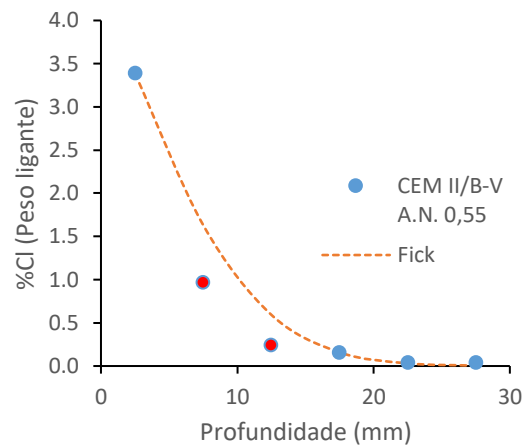


Figura E.16 - Perfil de cloratos (B55IIBV)

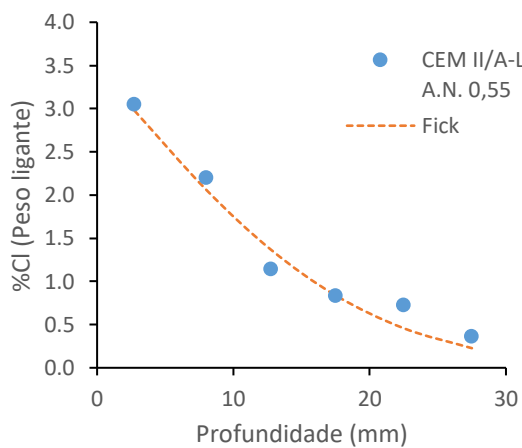


Figura E.17 - Perfil de cloratos (B55IIAL)

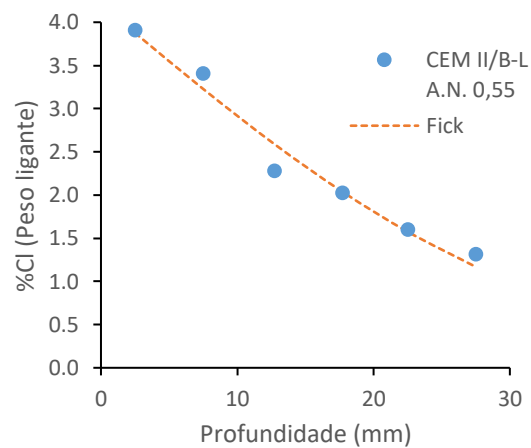


Figura E.18 - Perfil de cloratos (B55IIBL)

● Pontos desprezados na obtenção da curva de Fick

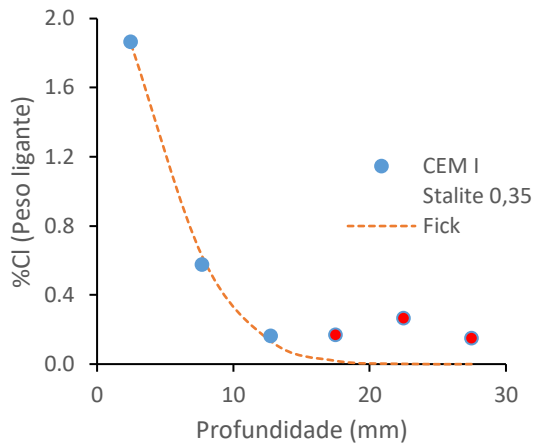


Figura E.19 - Perfil de cloretos (S35I)

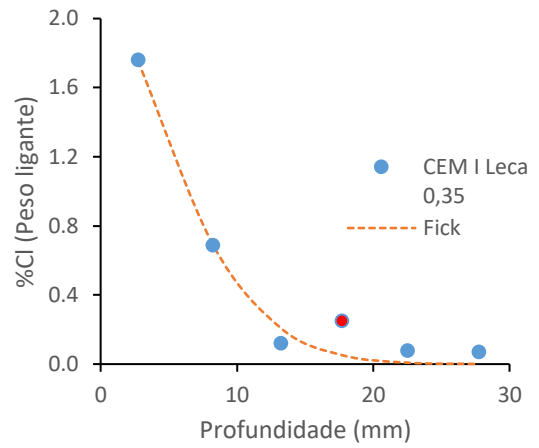


Figura E.20 - Perfil de cloretos (L35I)

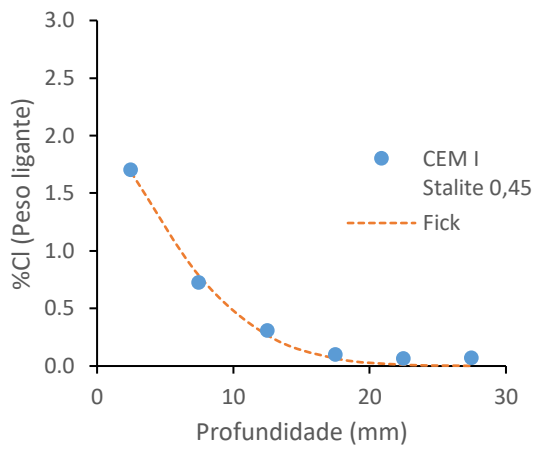


Figura E.21 - Perfil de cloretos (S45I)

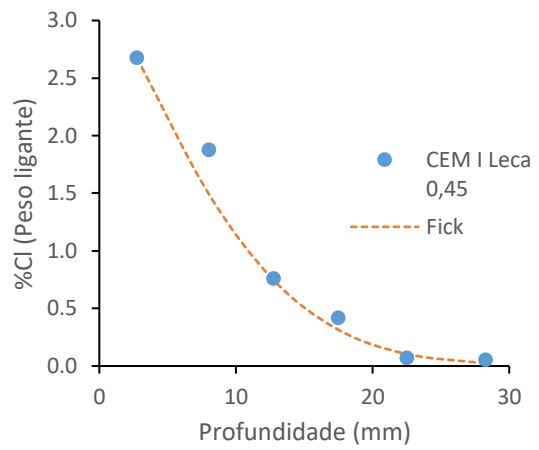


Figura E.22 - Perfil de cloretos (L45I)

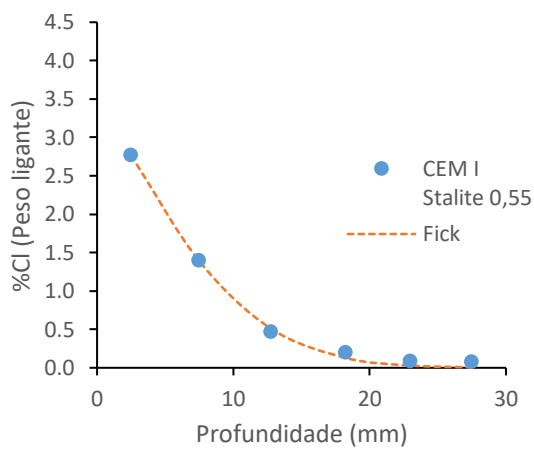


Figura E.23 - Perfil de cloretos (S55I)

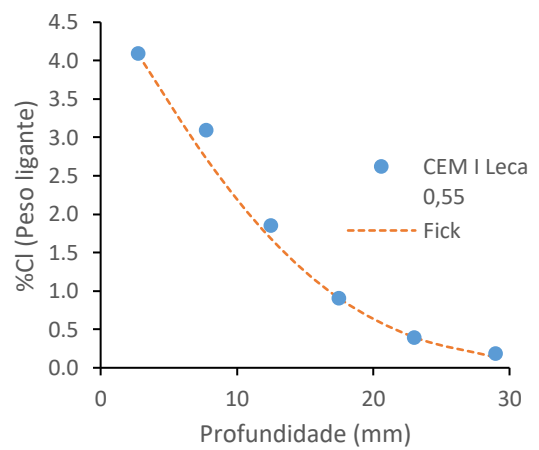


Figura E.24 - Perfil de cloretos (L55I)

● Pontos desprezados na obtenção da curva de Fick

Anexo F.

Quadro F.1 - Classificação proposta por Gjorv (1996)

Resistência do Betão	$D_{Cl,RCMT} (x10^{-12} m^2/s)$
Reduzida	>15
Moderada	10-15
Elevada	5-10
Muito elevada	2,5-5
Extremamente elevada	<2,5

Quadro F.2 - Quadro comparativo dos resultados obtidos no ensaio de migração e ensaio de imersão

a/l	Agregado	Ligante	Adição	$D_{Cl,90d,Imersão} x10^{-12}(m^2/s)$	$D_{Cl,28d,RCMT} x10^{-12}(m^2/s)$	$\Delta\%$
0,35	Natural	CEM I	0%	2,32	9,97	329
		CEM II/A-D	6% SF	1,32	5,95	349
		CEM II/A-V	15% Cz	1,29	9,73	657
		CEM II/B-V	30% Cz	1,17	9,74	732
		CEM II/A-L	15% FC	3,67	12,03	228
		CEM II/B-L	30% FC	15,43	15,12	-2
	Stalite	CEM I	0%	2,72	10,61	290
Leca	CEM I	0%	3,81	12,01	215	
0,45	Natural	CEM I	0%	4,23	14,32	238
		CEM II/A-D	6% SF	2,68	9,02	237
		CEM II/A-V	15% Cz	2,82	16,71	492
		CEM II/B-V	30% Cz	1,25	18,51	1377
		CEM II/A-L	15% FC	5,47	18,69	242
		CEM II/B-L	30% FC	23,34	-	-
	Stalite	CEM I	0%	4,16	11,82	284
Leca	CEM I	0%	6,98	13,65	96	
0,55	Natural	CEM I	0%	4,74	16,96	254
		CEM II/A-D	6% SF	5,22	14,20	172
		CEM II/A-V	15% Cz	5,78	23,34	304
		CEM II/B-V	30% Cz	4,47	25,22	464
		CEM II/A-L	15% FC	14,29	-	-
		CEM II/B-L	30% FC	41,29	-	-
	Stalite	CEM I	0%	4,87	16,26	234
Leca	CEM I	0%	11,21	19,47	74	

$$\Delta\% = \frac{D_{Cl,28d,RCMT} - D_{Cl,90d,Im}}{D_{Cl,90d,Im}} \quad (F.1)$$