



João Luís Gonçalves Pinto
Avaliação do efeito da carbonatação na
penetração de cloretos em betões contendo cinzas volantes

UMinho | 2017



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Luís Gonçalves Pinto

Avaliação do efeito da carbonatação na
penetração de cloretos em betões contendo
cinzas volantes

fevereiro de 2017



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

João Luís Gonçalves Pinto

Avaliação do efeito da carbonatação na
penetração de cloretos em betões contendo
cinzas volantes

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Aires Camões

AGRADECIMENTOS

À minha Mãe, pelo seu amor, carinho, esforço e sacrifício que fez para me conseguir manter a estudar, apesar de todas as dificuldades. Assim, foi possível tornar um dos objetivos da minha vida, e da vida dela, realizado.

À minha irmã, Maria Inês, pelo amor, carinho, motivação e pelo apoio sempre demonstrados.

À minha namorada, pelo amor, motivação e apoio sempre demonstrados.

Ao meu amigo, Luís Pedro Bidarra, pelo apoio, amizade e memórias criadas nesta caminhada, que nunca serão esquecidas.

Ao André, colega e amigo, pela ajuda, amizade e pelo companheirismo, com quem tive o prazer de partilhar estes anos de trabalho.

Ao professor Aires Camões, pela ajuda e disponibilidade prestadas ao longo da realização deste trabalho.

À Raphaele Malheiro, pela dedicação e pelo apoio prestados.

Ao Engenheiro Carlos Jesus, do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho, pela ajuda e disponibilidade prestadas ao longo deste trabalho.

A todos os que direta ou indiretamente, ao longo do meu período académico, me ajudaram a tornar este objetivo possível.

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA CARBONATAÇÃO NA PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM BETÕES CONTENDO CINZAS VOLANTES

RESUMO

A cinza volante (CV) é o material pozolânico mais produzido em todo mundo. O aumento da quantidade de aluminatos, proporcionada pela substituição de cimento por CV, é um dos fatores que conduz a uma diminuição da quantidade de cloretos livres. Por outro lado, devido às reações pozolânicas, inerentes à utilização de CV, o Ca(OH)_2 presente na matriz é consumido, facilitando o avanço da frente de carbonatação. Muito pouco é conhecido acerca da ação combinada da carbonatação e da penetração de cloretos em materiais cimentícios contendo CV.

Assim, este trabalho investiga a influência da adição de CV no coeficiente de difusão de cloretos em argamassas carbonatadas. Para isso, foram moldados provetes em argamassa com 0%, 20%, 40% e 60% de CV, utilizando cimento CEM I 42.5R e uma relação água/ligante 0.54, 0.51, 0.5 e 0.69 respectivamente. Após um período de cura de 90 dias e 15 dias de pré-condicionamento, os provetes foram introduzidos na câmara de carbonatação (20°C, 50% de HR e 5% de CO_2) onde permaneceram por um período de 15, 60 e 90 dias. Terminado o período de carbonatação, os provetes foram submetidos de imediato, ao ensaio de difusão por migração de cloretos com base na especificação LNEC E 463 (2004).

Os resultados alcançados sugerem que as argamassas carbonatadas apresentam um coeficiente de difusão de cloretos diferente do alcançado para as argamassas que não sofreram carbonatação, independentemente da percentagem de CV. Esta diferença deve ser tida em consideração, principalmente, em ambientes sujeitos à ação dos cloretos e, ao mesmo tempo, fortemente contaminados com CO_2 .

PALAVRAS-CHAVE: Argamassa, Cinzas volantes, Cloretos, Carbonatação

ASSESSMENT OF THE CARBONATION EFFECT ON CHLORIDE PENETRATION IN CONCRET WITH FLY ASHES

ABSTRACT

Fly ash is the most produced pozzolanic material in the world. The increase in the amount of aluminates provided by the substitution of cement by fly ashes is one of the factors that leads to a decrease in the amount of free chloride. On the other hand, due to the pozzolanic reactions inherent to the use of fly ashes, the $\text{Ca}(\text{OH})_2$ present in the cementitious matrix is consumed, facilitating the advance of the carbonation front. Very little is known about the combined action of carbonation and chloride penetration in cementitious materials containing fly ashes.

This work investigates the influence of the addition of fly ashes on the diffusion coefficient of chlorides in carbonated mortars. For this, mortar specimens with 0%, 20%, 40% and 60% CV were molded using CEM I 42.5R cement with a water/binder ratio of 0.54, 0.51, 0.5 and 0.69 respectively. After a curing period of 90 days and 15 days of preconditioning, the specimens were introduced into the carbonation chamber (20°C, 50% RH and 5% CO_2) where they remained for a period of 15, 60 and 90 days. After the carbonation period, the test specimens were immediately submitted to the chloride migration diffusion test based on the specification LNEC E 463 (2004).

The results suggest that carbonated mortars have a diffusion coefficient of chloride different from that achieved from mortars that didn't undergo carbonation, regardless of the percentage of fly ashes. This difference must be taken into account mainly in environments subject to the action of chlorides and at the same time heavily contaminated with CO_2 .

KEYWORDS: Mortar, Fly ashes, Chloride ions, Carbonation

ÍNDICE

1. ENQUADRAMENTO	1
1.1. Introdução	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estrutura da Tese	2
2. ESTADO DO CONHECIMENTO	5
2.1. Durabilidade do betão.....	5
2.1.1. Vida útil	7
2.1.2. Corrosão	9
2.2. Penetração de cloretos no betão.....	11
2.2.1. Mecanismos de transporte de cloretos	12
2.2.2. Fatores que influenciam a penetração de cloretos	14
2.2.3. Ensaios de penetração de cloretos	16
2.3. Carbonatação do betão.....	19
2.3.1. Como ocorre	19
2.3.2. Fatores que influenciam a carbonatação.....	21
2.4. Betão com cinzas volantes (CV)	23
2.4.1. Betão com CV x Penetração de cloretos	24
2.4.2. Betão com CV x Carbonatação	25
2.5. Ação combinada dos cloretos e da carbonatação	26
2.5.1. Betão comum.....	27
2.5.2. Betão com CV	28
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	31
3.1. Introdução	31
3.2. Caracterização dos materiais no estudo.....	31
3.2.1. Água	31
3.2.2. Cimento	31
3.2.3. CV.....	32
3.2.4. Agregados.....	33
3.3. Preparação dos provetes	35
3.3.1. Considerações gerais	35
3.3.2. Produção da argamassa.....	36

3.3.3. Provetes para ação combinada	36
3.3.4. Provetes de Referência.....	38
3.4. Características das argamassas.....	39
3.4.1. Estado fresco	39
3.4.2. Estado endurecido	42
3.5. Ensaio acelerados	42
3.5.1. Difusão de cloretos por migração	42
3.5.2. Carbonatação.....	46
3.5.3. Ação combinada.....	48
3.6. Ensaio complementares	50
3.6.1. Absorção de água por capilaridade	50
3.6.2. Absorção de água por imersão	53
4. RESULTADOS.....	55
4.1. Introdução	55
4.2. Caracterização das argamassas	55
4.3. Ensaio de referência – Migração.....	59
4.4. Ação combinada dos agentes agressores	63
4.4.1. Carbonatação.....	63
4.4.2. Difusão de cloretos por migração	67
4.5. Ensaio complementares	71
4.5.1. Absorção de água por capilaridade	71
4.5.2. Absorção de água por imersão	75
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	77
5.1. Influência das CV sobre o coeficiente de difusão de cloretos	77
5.2. Influência da carbonatação sobre o coeficiente de difusão de cloretos	78
5.2.1. Sem CV	78
5.2.2. Com CV	78
5.3. Avaliação dos parâmetros de durabilidade	83
5.3.1. Absorção de água por capilaridade	83
5.3.2. Absorção de água por imersão	85
6. CONCLUSÕES	89
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 – Relações entre os fatores principais que influenciam a durabilidade dos materiais dos elementos de betão armado (CEB, 1992) [16].....	6
Figura 2-2 – Modelo conceptual da vida útil de Tuutti [19]	8
Figura 2-3 – Influência da humidade no coeficiente de difusão de oxigénio [30]	10
Figura 2-4 – Influência da humidade na resistividade do betão [30]	11
Figura 2-5 – Possível forma da ocorrência dos iões de cloreto nas estruturas de betão [32] ...	12
Figura 2-6 – Penetração de cloretos através do ensaio de molhagem, á esquerda, e secagem, á direita [17].	17
Figura 2-7 – Simulação da penetração de cloretos em ambiente com Humidade Relativa constante e a ciclos de molhagem e secagem [17]	17
Figura 2-8 – Exemplo da montagem do ensaio de migração [55])	18
Figura 2-9 – Mecanismo simplificado da carbonatação [30]	20
Figura 2-10 - Zonas envolvidas no mecanismo de carbonatação e a variação do pH ao longo da profundidade [30]	21
Figura 2-11 – Representação esquemática da difusão de CO ₂ [50]	22
Figura 2-12 – Efeito fíler das cinzas volantes [59].....	23
Figura 2-13 – Representação esquemática das zonas de agressividade em ambiente marinho [34]	26
Figura 3-1 - Agitação manual.....	34
Figura 3-2 – Agitação com auxílio mecânico.....	34
Figura 3-3 - Curva granulométrica do agregado	35
Figura 3-4 – Moldagem dos moldes	37

Figura 3-5 – Provete revestido com parafina	38
Figura 3-6 – Superfícies do disco e do molde já lubrificadas	40
Figura 3-7 - Compactador	40
Figura 3-8 – Amostra de argamassa após a retirada do molde	41
Figura 3-9 – Resultado do processo e medição do espalhamento.....	41
Figura 3-10 – Provetes introduzidos nas mangas de borracha apertados com as braçadeiras de aço inoxidável	44
Figura 3-11 – Profundidade de penetração dos cloretos medida em mm (Camões, 2002).....	46
Figura 3-12 – Provete após o ensaio acelerado de carbonatação e pulverização com fenolftaleína	47
Figura 3-13 – Metades do provete submetido ao ensaio combinado pulverizadas com as soluções de modo à obtenção de resultados.....	49
Figura 3-14 – Ensaio de capilaridade em curso	51
Figura 4-1 – Valores da resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias para os provetes de 0% de CV	55
Figura 4-2 - Valores da resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias para os provetes de 20% de CV	56
Figura 4-3 - Valores da resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias para os provetes de 40% de CV	56
Figura 4-4 - Valores da resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias para os provetes de 60% de CV	57
Figura 4-5 – Variação da resistência á compressão aos 7 dias para as diferentes composições	57
Figura 4-6 - Variação da resistência á compressão aos 28 dias para as diferentes composições	58

Figura 4-7 - Variação da resistência á compressão aos 90 dias para as diferentes composições	58
Figura 4-8 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos de cada composição dos provetes após 15 dias em película plástica.....	59
Figura 4-9 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos de cada composição dos provetes sujeitos a 60 dias em película plástica	60
Figura 4-10 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos de cada composição dos provetes sujeitos a 90 dias em película plástica	60
Figura 4-11 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo para os provetes de 0% CV sem carbonatação.....	61
Figura 4-12 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo para os provetes de 20% CV sem carbonatação.....	61
Figura 4-13 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo para os provetes de 40% CV sem carbonatação.....	62
Figura 4-14 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo para os provetes de 60% CV sem carbonatação.....	62
Figura 4-15 - Profundidade da carbonatação para cada composição após 15 dias de carbonatação.....	63
Figura 4-16 - Profundidade da carbonatação para cada composição após 60 dias de carbonatação.....	64
Figura 4-17 - Profundidade da carbonatação para cada composição após 90 dias de carbonatação.....	64
Figura 4-18 - Variação da profundidade da carbonatação com o tempo para a composição de 0% CV	65
Figura 4-19 - Variação da profundidade da carbonatação com o tempo para a composição de 20% CV	65

Figura 4-20 - Variação da profundidade da carbonatação com o tempo para a composição de 40% CV	66
Figura 4-21 - Variação da profundidade da carbonatação com o tempo para a composição de 60% CV	66
Figura 4-22 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos de cada composição dos provetes sujeitos a 15 dias de carbonatação	67
Figura 4-23 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos de cada composição dos provetes sujeitos a 60 dias de carbonatação	68
Figura 4-24 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos de cada composição dos provetes sujeitos a 90 dias de carbonatação	68
Figura 4-25 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo de carbonatação para os provetes de 0% CV	69
Figura 4-26 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo de carbonatação para os provetes de 20% CV	69
Figura 4-27 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo de carbonatação para os provetes de 40% CV	70
Figura 4-28 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo de carbonatação para os provetes de 60% CV	70
Figura 4-29 - Cinética de absorção capilar para a composição de 0% CV	71
Figura 4-30 - Curva de absorção capilar e respetiva linha de tendência para a composição de 0% CV	72
Figura 4-31 - Cinética de absorção capilar para a composição de 20% CV	72
Figura 4-32 - Curva de absorção capilar e respetiva linha de tendência para a composição de 20% CV	73
Figura 4-33 - Cinética de absorção capilar para a composição de 40% CV	73

Figura 4-34 - Curva de absorção capilar e respetiva linha de tendência para a composição de 40% CV	74
Figura 4-35 - Cinética de absorção capilar para a composição de 60% CV	74
Figura 4-36 - Curva de absorção capilar e respetiva linha de tendência para a composição de 60% CV	75
Figura 5-1 - Coeficientes de difusão de cloretos de cada composição em estudo, 0%, 20%, 40% e 60%, para cada tempo de estudo, 15, 60 e 90 dias	77
Figura 5-2 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo de carbonatação acelerada e sem carbonatação para os provetes de 0% CV	78
Figura 5-3 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo de carbonatação acelerada e sem carbonatação para os provetes de 20% CV	79
Figura 5-4 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo de carbonatação acelerada e sem carbonatação para os provetes de 40% CV	80
Figura 5-5 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo de carbonatação acelerada e sem carbonatação para os provetes de 60% CV	81
Figura 5-6 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos de cada composição com CV dos provetes sujeitos a 15 dias de carbonatação acelerada	82
Figura 5-7 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos de cada composição com CV dos provetes sujeitos a 60 dias de carbonatação acelerada	82
Figura 5-8 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos de cada composição com CV dos provetes sujeitos a 90 dias de carbonatação acelerada	83

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1 – Acréscimo de tempo para iniciar a corrosão em função do teor de C_3A [46])... 15	15
Tabela 2-2 – Coeficiente de difusão em função da relação a/l e da temperatura [44])..... 15	15
Tabela 2-3 – Coeficiente de difusão de cloretos em pastas de cimento com relação a/l de 0.5 [44]..... 24	24
Tabela 3-1 - Composição química do cimento CEM I 42.5R [71]..... 32	32
Tabela 3-2 - Propriedades físicas do cimento CEM I 42.5R [71]..... 32	32
Tabela 3-3 - Propriedades mecânicas do cimento CEM I 42.5 R [71] 32	32
Tabela 3-4 – Composição química das CV..... 33	33
Tabela 3-5 - Razões A/L para cada tipo de composição..... 39	39
Tabela 3-6 – Diferença de potencial e duração do ensaio de migração (LNEC E463 (2004) [55]) 45	45
Tabela 3-7 – Frequência das pesagens dos provetes em ensaio de absorção de água por capilaridade 52	52
Tabela 4-1 - Valores das massas dos provetes saturados, das massas dos provetes saturados imersos e das massas dos provetes secos e valores das absorções capilares para as situações de estudo 76	76
Tabela 5-1 – Absorção Capilar das amostras de 0% de CV para as situações de estudo 84	84
Tabela 5-2 - Absorção Capilar das amostras de 20% de CV para as situações de estudo 84	84
Tabela 5-3 - Absorção Capilar das amostras de 40% de CV para as situações de estudo 85	85
Tabela 5-4 - Absorção Capilar das amostras de 60% de CV para as situações de estudo 85	85
Tabela 5-5 - Valores das absorções de água para as situações de estudo dos provetes de 0% CV 86	86

Tabela 5-6 - Valores das absorções capilares para as situações de estudo dos provetes de 20% CV.....	86
Tabela 5-7 - Valores das absorções capilares para as situações de estudo dos provetes de 40% CV.....	87
Tabela 5-8 - Valores das absorções capilares para as situações de estudo dos provetes de 60% CV.....	87

1. ENQUADRAMENTO

1.1. Introdução

Sendo o betão o material mais utilizado na construção, estudos da durabilidade do mesmo são de maior importância para a indústria da construção, devido ao aumento das preocupações da durabilidade do betão e devido a um elevado número de estruturas que apresentam deterioração precoce. Deste modo, de maneira a garantir que as estruturas de betão sejam sustentáveis, tem de se garantir que as mesmas tenham durabilidade [1].

A ação da carbonatação e dos cloretos são os principais mecanismos de deterioração, sendo estes bastante estudados de forma isolada. A ação combinada destes mecanismos de degradação tem sido recentemente objeto de estudo, sendo que a combinação da carbonatação e da ação dos cloretos pode ocorrer em várias situações [2] como, por exemplo, em ambientes marítimos em que as estruturas podem estar submersas e expostas a ciclos de molhagem e secagem e em que as estruturas se encontram numa zona de respingo onde o betão alcança um teor de humidade baixo.

A adição de CV em matrizes cimentícias tem sido muito utilizada de modo a tornar a matriz mais resistente à ação dos cloretos. Além disso, a incorporação de resíduos ao betão permite-nos criar betões mais sustentáveis. As CV contêm sílica amorfa que, por sua vez, vai reagir com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) resultante da hidratação do cimento, provocando uma redução na porosidade da matriz cimentícia e, conseqüentemente, uma diminuição da penetração de agentes agressores como, por exemplo, os iões cloreto [2].

As reações da sílica das CV com o hidróxido de cálcio do cimento hidratado, reações pozolânicas, também provocam a diminuição da reserva alcalina do betão, o que vai afetar, pela negativa a resistência à carbonatação do mesmo, podendo a frente de carbonatação ter um avanço mais rápido que num betão sem CV [3].

Analisando os estudos da ação combinada da carbonatação e da penetração dos cloretos, pode-se constatar que ainda não há consenso sobre o efeito da carbonatação na penetração dos cloretos. Jung *et al.* (2007) [4] concluíram que a adição de CV é extremamente eficaz para a redução da penetração dos iões cloreto. No seu estudo utilizaram no betão duas percentagens de CV em substituição do cimento, sendo estas de 0% e 20%, uma relação A/C de 0.38 e 0.42, e verificaram que existe uma maior fixação na concentração superficial de cloretos e que,

devido à menor porosidade do betão, a quantidade de iões que penetram para o interior do betão diminuía. Chengfang *et al.* (2012) [5] concluíram que, devido há existência de carbonatação no betão, quanto maior fosse o tempo de carbonatação, maior seria também o coeficiente de difusão de cloretos, tendo este efeito maior relevância em betões com CV, provocado pela reduzida quantidade de CaOH_2 consumido nas reações pozolânicas.

Assim, visto que este tema é de elevada importância e existe uma grande falta de informação sobre o mesmo na literatura existente, este trabalho pretende contribuir para o conhecimento acerca da influência da adição de CV no coeficiente de difusão de cloretos em misturas cimentícias carbonatadas.

1.2. Objetivos

Devido à existência de pouca informação na comunidade científica sobre a ação combinada da carbonatação e da penetração de cloretos, o principal objetivo desta dissertação vai ser estudar este fator, de modo a contribuir para o melhor conhecimento do mesmo.

De uma forma mais específica, com este trabalho pretende-se:

- Avaliar a profundidade de carbonatação para vários tempos de carbonatação;
- Avaliar a influência do tempo de carbonatação do betão no coeficiente de difusão de cloretos através do ensaio de migração em regime não estacionário;
- Avaliar o efeito de várias percentagens de CV na composição do betão na profundidade de carbonatação e sucessivo efeito no coeficiente de difusão de cloretos;
- Avaliar o efeito da carbonatação nos seguintes indicadores de durabilidade: absorção de água por capilaridade e absorção de água por imersão.

1.3. Estrutura da Dissertação

O presente trabalho encontra-se estruturado em seis capítulos principais:

No presente capítulo, *Capítulo 1. Introdução*, é feita uma pequena introdução ao tema em estudo e à importância do estudo do mesmo, sendo também apresentados os objetivos propostos para o trabalho realizado.

No *Capítulo 2. Estado do conhecimento*, é feita uma revisão bibliográfica, onde são abordadas várias considerações gerais sobre o betão. É tratado o tema da sua durabilidade, os mecanismos

e fatores de penetração de agentes agressores no betão, como a carbonatação e os cloretos, bem como os ensaios utilizados para estudar estes dois fatores. A utilização de cinzas volantes na composição do betão é também tratada tendo em conta os agentes agressores referidos. Por último, é feita uma revisão bibliográfica do tema central desta dissertação, a ação combinada dos cloretos e da carbonatação.

No *Capítulo 3. Trabalho experimental*, são apresentados detalhadamente todos os trabalhos efetuados em laboratório, a fim de melhorar a compreensão do trabalho efetuado para o estudo do tema desta dissertação. Após uma pequena introdução, é feita uma caracterização dos materiais utilizados na composição dos provetes para estudo, esta é seguida da descrição da forma como os provetes foram preparados para os ensaios. São estudadas as características das argamassas produzidas, e descritos os ensaios acelerados realizados, bem como os ensaios complementares, como a absorção de água por capilaridade e imersão.

No *Capítulo 4. Resultados*, são apresentados os resultados obtidos em todos os ensaios realizados no trabalho experimental, ou seja, os ensaios de caracterização das argamassas, os ensaios acelerados e os ensaios complementares.

No *Capítulo 5. Análise dos resultados*, os resultados apresentados no Capítulo 4 são analisados.

No *Capítulo 6. Conclusões*, são apresentadas as principais conclusões referentes aos ensaios e resultados obtidos, bem como futuros trabalhos a realizar para complementar e entender melhor o tema em estudo.

2. ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1. Durabilidade do betão

No início da década de 70, e numa altura em que as estruturas de betão eram consideradas com vida útil praticamente infinita, começou a haver uma preocupação com as mesmas, visto que estas começaram a apresentar em determinadas condições de exposição, uma certa deterioração precoce. Nas décadas de 80 e 90 e devido aos fatores observados na década de 70, o betão e a sua durabilidade foram um forte ponto de pesquisa [6].

Quando surgiram as primeiras definições relativamente à durabilidade de betões, os conceitos de durabilidade e vida útil acabaram por ser confundidos devido à forma simplista como foram caracterizados. A resistência do betão ao ataque de agentes agressivos, físicos e químicos, é usualmente caracterizada pela expressão “durabilidade do betão”. Esta expressão, no campo relacionado com o betão, é entendida como sendo vaga, porque a natureza, intensidade e os diversos mecanismos que estão associados a cada um desses ataques podem variar consideravelmente [6].

Considera-se, assim, durável a estrutura de betão que durante a sua vida útil conserva os requisitos de projeto em termos de segurança, funcionalidade e estética, sem custos de manutenção não previstos [7].

A durabilidade das estruturas de betão tem sido geralmente encarada de uma forma prescritiva, baseada no cumprimento de determinados requisitos, impostos estes na NP EN 206-1 (2007) [8], na LNEC E464 (2005) [9] e na EN 1992-1-1 (2008) [10], onde preveem que a durabilidade destas estruturas será assegurada, através da imposição de uma razão água/ligante (A/L) máxima, uma dosagem de cimento mínima e uma espessura de recobrimento mínima das armaduras [11].

Atualmente, às estruturas de betão armado é atribuído um tempo de vida útil que varia de 10 a 100 anos [12]. A possibilidade de estas estruturas terem uma vida útil superior ou igual a 50 anos é bastante alta, embora a observação de obras recentes nos permita verificar que muitas se degradam a um ritmo acelerado, provocando intervenções significativas a idades bastantes jovens da estrutura [13,14].

Bakker (1991) [15] diz-nos que da conjugação de diferentes materiais, utilizados nas estruturas de betão armado, apresentando estes diferentes durabilidades individuais, dizendo que estas estruturas não apresentam uma durabilidade homogénea. A forma de execução da estrutura é outro fator que afeta a durabilidade da mesma, por isso, são essenciais para a mesma, boas práticas de execução e acabamento.

Sendo o desempenho a capacidade de a estrutura satisfazer os fins para que foi projetada, devido aos efeitos complexos provocados pelo meio ambiente sobre as estruturas e todas as reações envolvidas, a melhoria do desempenho ao longo da vida útil da mesma não pode ser obtido apenas pelo aumento da qualidade dos materiais usados. Ou seja, para que isso aconteça, tem de se atuar em diferentes vertentes: na fase de projeto da estrutura e da arquitetura, a nível de processos de execução da obra e nos procedimentos relativos à inspeção e manutenção da estrutura [16].

As relações entre os fatores principais que influenciam a durabilidade dos elementos de betão armado e as suas consequências no desempenho estão resumidas na Figura 2-1.

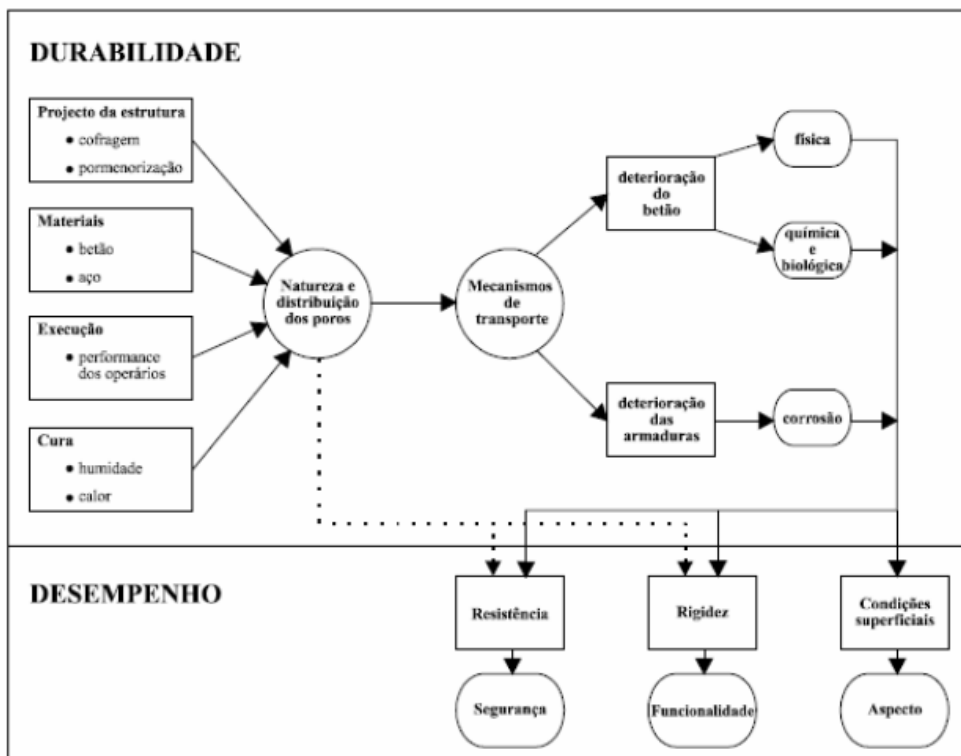


Figura 2-1 – Relações entre os fatores principais que influenciam a durabilidade dos materiais dos elementos de betão armado [16]

Podemos observar quatro fatores principais que influenciam fortemente a qualidade da estrutura de betão armado, sendo que estes definem a natureza e distribuição dos poros, influenciando, assim, os mecanismos de transporte que, por sua vez, influenciam a deterioração do betão e das armaduras.

A deterioração das estruturas de betão é gravemente afetada pelo transporte de gases, de água e de agentes agressivos dissolvidos em água, dependendo a facilidade de transporte destes fatores, da rede porosa e das condições ambientais a que o betão está sujeito [17].

A quantidade e dimensão dos poros capilares depende essencialmente da razão A/L, do grau de hidratação e do tipo de cimento utilizado, sendo a água pura ou com agentes agressivos dissolvidos nesta, o dióxido de carbono, os cloretos e o oxigénio, os três principais fluidos que afetam a durabilidade do betão [18].

2.1.1. Vida útil

É de fundamental importância estimar a vida útil das estruturas de betão armado para que, de uma forma quantitativa, se possa abordar a questão da sua durabilidade.

A vida útil é descrita na NP EN 206-1 (2007) [8] como “o período de tempo durante o qual o desempenho do betão na estrutura se mantém a um nível compatível com a satisfação dos requisitos de desempenho da estrutura, desde que haja uma adequada manutenção”.

O fenómeno da corrosão em estruturas de betão armado tem sido abordado na maioria dos casos através do modelo conceptual de vida útil de Tuutti [19].

Este autor propõe um modelo simplificado de abordagem da vida útil para as estruturas de betão armado, considerando a degradação das mesmas devido ao fenómeno da corrosão das armaduras.

Segundo o modelo conceptual de Tuutti, este modelo pode ser exposto primeiramente, através de uma fase de iniciação seguida de uma fase de propagação da corrosão (Figura 2-2).

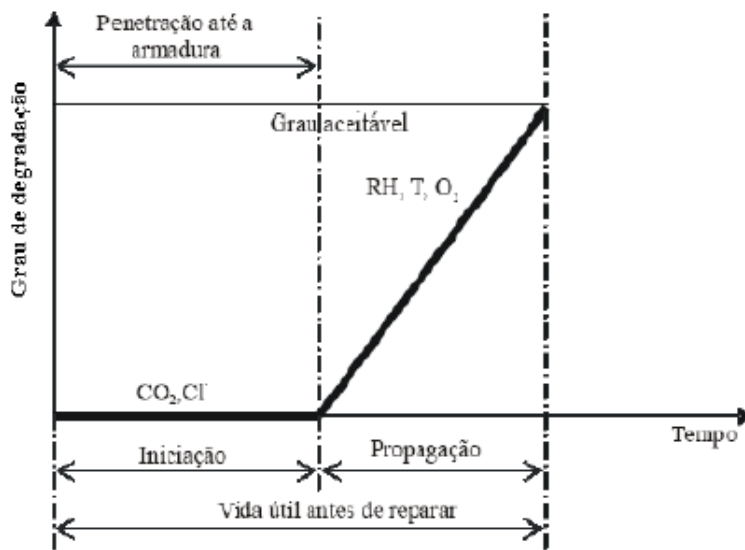


Figura 2-2 – Modelo conceitual da vida útil de Tuutti [19]

O período de iniciação da corrosão corresponde ao período no qual os agentes agressivos são transportados através do recobrimento até atingirem a armadura, provocando a sua despassivação [20].

A despassivação ocorrida, atingido o fim do período de iniciação, depende das características de agressividade do meio em que a estrutura se encontra exposta e das características dos materiais utilizados no betão [21].

Após a despassivação das armaduras, dá-se o início do período de propagação [22].

O período de propagação é caracterizado pelo desenvolvimento de reações de corrosão, mais ou menos rapidamente, em função das variáveis que controlam a cinética das reações, ou seja, em função da disponibilidade de oxigénio, da resistividade do meio, da temperatura, etc. [19].

Durante este período, a corrosão da armadura começa a desenvolver-se com a formação da pilha eletroquímica e prolonga-se até que a estrutura chegue a um grau de deterioração inaceitável, seja do ponto de vista de segurança, funcionalidade ou estética [23].

A maioria dos modelos de corrosão utiliza o Estado Limite de Utilização, considerando-o, na maioria dos casos, como o início da fendilhação do betão de recobrimento causada pela corrosão da armadura ou a despassivação da mesma [24].

2.1.2. Corrosão

A corrosão pode ser definida como a transformação de um material metálico através de reações químicas decorrentes da sua interação com o meio ambiente [6].

Na proteção das armaduras, o betão oferece às mesmas uma dupla proteção: por um lado, protege-as dos agentes agressores através do betão de recobrimento, e por outro, o ambiente alcalino, obtido devido à grande quantidade de hidróxido de cálcio produzido durante as reações de hidratação dos silicatos de cálcio. Assim, o pH do betão é de aproximadamente 13, originado pela solução contida nos poros no interior do betão, e que permite a formação de uma película passivadora que envolve a armadura [25].

Segundo Freitas (2013) [26], os principais mecanismos de corrosão que afetam o betão armado são a carbonatação e a penetração de cloretos.

O processo de corrosão tem início quando, em presença de humidade e oxigénio, a película passivadora que envolve a armadura é destruída, podendo essa destruição estar relacionada com a carbonatação do betão, ou seja, a diminuição do pH da solução dos poros para valores inferiores a 9, ou pela ação da penetração dos iões cloreto que afeta as armaduras quando ultrapassado um certo valor crítico [25].

O aparecimento de manchas de cor castanha ou avermelhada, mais conhecidas por ferrugem, é o primeiro sinal visível na corrosão das armaduras [6].

Os atributos do betão, o meio ambiente e a disposição das armaduras são os principais fatores que condicionam este fator [27].

A corrosão pode ocorrer em duas formas: quimicamente, onde esta está associada à formação de uma película aderente, uniforme e de baixa espessura, na ordem dos 10 μm , podendo esta película retardar o processo de corrosão, atuando como uma barreira protetora e, electroquimicamente, quando o metal entra em contacto com um eletrólito ou uma atmosfera húmida, resultando daí a formação de óxidos ou hidróxidos, sendo considerada esta forma de corrosão o verdadeiro tipo corrosão [28].

A corrosão das armaduras no betão armado pode apresentar-se de diversas formas, sendo de maior importância para este trabalho a corrosão generalizada e localizada (picadas), visto que estas se referem à carbonatação e aos iões de cloreto, respetivamente.

A corrosão uniforme é consequência de uma perda generalizada da película passivante resultante da lixiviação, do processo de carbonatação ou da excessiva presença de iões cloreto no betão [25].

A corrosão localizada (picadas) pode ser designada pela formação de pequenas perfurações, as chamadas picadas, que surgem devido à perda localizada da película passivante. Esta é considerada como uma corrosão muito grave devido à sua elevada velocidade de atuação [25].

Como principais fatores para a corrosão das armaduras temos: a humidade relativa, o recobrimento de betão, o estado superficial das armaduras, a compacidade do betão bem como a sua composição (relação A/L, tipo e dosagem de cimento) [29].

O teor de humidade, a espessura do recobrimento e a relação A/L, que afeta a porosidade do betão de recobrimento, influenciam a quantidade de oxigénio que se difunde até às armaduras. O coeficiente de difusão do oxigénio sofre uma diminuição quando o valor de humidade relativa no interior dos poros aumenta, sendo esta diminuição favorável, pois dificulta o processo de corrosão (Figura 2-3). A diminuição do coeficiente de difusão de oxigénio acontece porque este tem de se dissolver previamente na água contida no interior do betão [25].

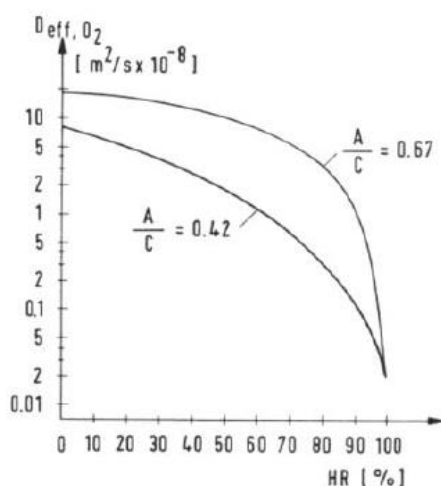


Figura 2-3 – Influência da humidade relativa no coeficiente de difusão de oxigénio [30]

De acordo com Silva (2014) [25], para que o processo de corrosão se desenvolva, é necessária uma quantidade mínima de humidade nos poros. Sendo assim, quanto mais elevada for a humidade nos poros, mais elevada será a velocidade de corrosão, ou seja, menor será o valor da resistividade elétrica (Figura 2-4).

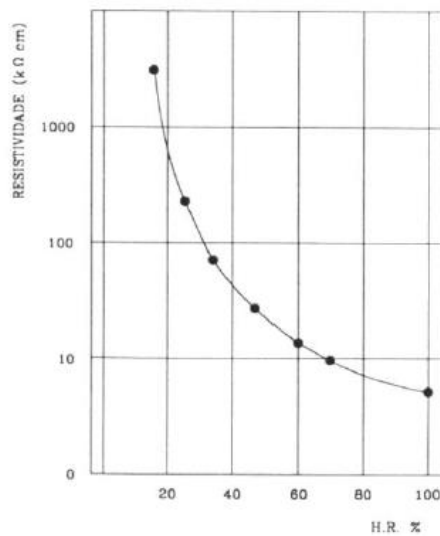


Figura 2-4 – Influência da umidade na resistividade do betão [30]

No mecanismo de corrosão a temperatura ambiental tem um papel importante, devido à sua capacidade de controlar a mobilidade das substâncias envolvidas no processo de corrosão bem como a velocidade das reações químicas envolvidas na mesma [31].

2.2. Penetração de cloretos no betão

Segundo Melo (2013) [1], a forma mais grave de degradação que pode ocorrer no betão armado é devida à ação dos cloretos, podendo esta ocorrer devido aos constituintes do betão ou ao ambiente a que a estrutura se encontra exposta. Dentro dos constituintes, os cloretos podem-se encontrar nos adjuvantes adicionados ao betão, bem como nos agregados ou na água utilizada na amassadura.

A absorção capilar e a difusão são, segundo Cascudo (1997) [32], os principais mecanismos de transporte de cloretos presentes no betão. A absorção capilar acontece à superfície do betão onde ocorrem os ciclos de molhagem e secagem. A difusão dá-se no interior do betão, onde é constante a presença do eletrólito.

Num betão comum e sem adições, os cloretos podem ser encontrados no seu interior sob três diferentes formas (Figura 2-5): quimicamente, estando ligados estes ao aluminato tricálcico (C_3A), sob a forma de iões livres na solução dos poros e adsorvidos na superfície dos poros do betão [2].



Figura 2-5 – Possível forma da ocorrência dos íões de cloreto nas estruturas de betão [32]

Pereira (2001) [33] diz que os cloretos que têm mais probabilidade de penetrarem no betão são os que se encontram dissolvidos em água, sendo que Meira (2004) [34] e Fortes (1995) [35] afirmam que os cloretos livres nos poros de betão penetram juntamente com a água e com o oxigénio.

Andrade (1992) [36], Mohammed e Hamada (2003) [37] esclarecem ainda que as normas fazem sempre referência ao limite de cloretos totais, porque devido aos efeitos de processos como a carbonatação os mesmos podem voltar à solução.

2.2.1. Mecanismos de transporte de cloretos

Malheiro (2013) [2] diz que a facilidade com que os fluidos e íões que penetram no betão e se deslocam dentro do mesmo, através da rede de poros da microestrutura do betão, influencia a durabilidade do mesmo.

A absorção capilar, a difusão iónica, a permeabilidade e a migração são, segundo Cascudo (1997) [32], os mecanismos que transportam os cloretos para o interior do betão. Pode-se também afirmar que a absorção capilar e a difusão iónica, na maioria dos casos, são os mecanismos de transporte de cloretos mais encontrados [38].

A absorção capilar consiste no processo de retenção de água nos poros do betão devido às tensões superficiais atuantes nos poros capilares do betão [1].

Para Helene (1993) [27], a intercomunicabilidade dos capilares é mais importante que a dimensão dos mesmos, pois, segundo as suas conclusões, um betão com uma relação A/L baixa, ou seja, com um menor diâmetro dos poros capilares, tem uma menor capacidade de absorção do fluido.

De acordo com Ferreira (2000) [39], o transporte destes fluidos é influenciado devido às características do fluido, sendo elas a viscosidade, a densidade e a tensão superficial, e também as características do betão, como a estrutura dos poros e a energia superficial.

A difusão ocorre quando existem diferenças de concentração entre o betão e o meio onde o mesmo se encontra [1]. Esta ocorre de uma região de alta concentração para uma de baixa concentração [40].

Polito (2006) [41] diz que este fenómeno acontece apenas com a intercomunicabilidade dos capilares e com a existência de eletrólito.

Segundo Cascudo (1997) [32], em termos de durabilidade do betão, estas diferenças de concentração podem ser mais significativas que a permeabilidade do betão.

A difusão é caracterizada através das leis de Fick, onde pelas mesmas se consegue estimar o coeficiente de difusão D . A primeira Lei de Fick considera um fluxo de iões constante no tempo e ao longo da secção, exprimindo assim a difusão em estado estacionário. A primeira Lei de Fick (equação (1)), onde Q_s é o fluxo de iões, D_{ef} é o coeficiente de difusão efetivo, $\frac{\partial C}{\partial x}$ é o gradiente de concentração, C é a concentração de iões na solução e x é a profundidade.

$$Q_s = D_{ef} \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

A segunda Lei de Fick (equação (2)) caracteriza mais corretamente o processo da difusão natural, sendo que esta considera um regime não estacionário, ou seja, admite variações no fluxo dos iões tendo em conta a profundidade e o tempo decorrido.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2)$$

Este tipo de transporte é um mecanismo indireto de medição da porosidade do betão. Existem vários fatores que influenciam a porosidade e, conseqüentemente, a permeabilidade do betão, sendo o tipo de cimento, a relação A/L, o grau de hidratação do cimento, o teor e tipo de adição e a presença de fissuras no betão as principais a serem consideradas [1].

Segundo Tang (1999) [42], a migração é o movimento de substâncias sob a ação de um campo elétrico. Este campo elétrico pode ter origem na deflagração de pilhas de corrosão eletroquímicas ou de uma diferença de potencial gerada por uma fonte externa [27]. Estes mecanismos são usados, geralmente, em ensaios acelerados de transporte de cloretos no betão [43].

2.2.2. Fatores que influenciam a penetração de cloretos

Para controlar a penetração de cloretos é necessário um conhecimento sobre os fatores que influenciam o transporte de cloretos, tendo em conta os materiais escolhidos e as condições de exposição a que estão sujeitas as estruturas.

Existem muitos fatores que influenciam a penetração dos cloretos, sendo de seguida tratados alguns como a presença de adições, tipo de cimento, relação A/L, tempo de cura, fissuração, temperatura e humidade relativa.

A presença de adições minerais no betão pode reduzir a penetração dos agentes agressores no mesmo [33].

Page *et al.* (1981) [44] e Oh e Jang (2007) [45], através da adição de cinzas volantes no betão, apresentam uma redução significativa no coeficiente de difusão de cloretos.

Os efeitos benéficos das adições devem-se principalmente à microestrutura mais densa da pasta de cimento hidratada [2].

Um dos principais aspetos que o tipo de cimento influencia na penetração dos cloretos é a fixação de cloretos na matriz cimentícia.

Essa fixação dos cloretos está relacionada com a quantidade de C_3A existente no cimento utilizado, visto que o aluminato tricálcico favorece a fixação dos iões cloreto.

Rasheeduzzafar *et al.* (1990) [46] chegaram à conclusão, através do estudo de cimentos com teores de C_3A diferentes, que cimentos com teores mais elevados de C_3A podem ter um desempenho bastante superior ao dos cimentos com teores de C_3A menores (Tabela 2-1).

Tabela 2-1 – Acréscimo de tempo para iniciar a corrosão em função do teor de C₃A [46])

Teor de C ₃ A (%)	Cloretos livres (%)	Acréscimo de tempo para iniciar a corrosão
2	86	Referência
9	58	1,75 vezes
11	51	1,93 vezes
14	36	2,45 vezes

Oh e Jang (2007) [45] estudaram a difusão de cloretos de dois tipos de cimento e chegaram à mesma conclusão, tendo os resultados mostrado que o coeficiente de difusão das amostras com maior teor de C₃A era inferior ao das amostras com menor teor de C₃A.

A relação A/L está profundamente ligada à porosidade do betão e, por isso, se houver um aumento dessa relação o transporte de cloretos será facilitado, acontecendo o oposto se essa relação for diminuída. Na tabela 2-2, Page *et al.* (1981) [44] mostram valores do coeficiente de difusão bastante altos para relações A/L elevadas.

Tabela 2-2 – Coeficiente de difusão em função da relação a/l e da temperatura [44])

Temperatura (°C)	Relação a/l		
	0,40	0,50	0,60
	Coeficiente de difusão (x10 ⁻⁹ cm ² xs ⁻¹)		
7	11,03	20,70	51,90
14,5	12,70	23,60	84,60
25	26,00	44,70	123,50
35	44,70	94,80	165,20
44	84,00	183,6	318,20

O tempo de cura influencia a penetração de cloretos porque durante o período de cura ocorrem várias reações químicas relativas à hidratação do cimento, sendo estas reações mais importantes nas primeiras idades, condicionando a rede porosa do betão endurecido [47].

Com o avanço do tempo, ou seja, da hidratação do cimento, a porosidade vai ficando mais refinada, os poros vão diminuindo e essa diminuição dificulta a penetração de cloretos a partir do seu mecanismo mais importante, a difusão [48]. É assim possível concluir que o transporte de cloretos ocorre com uma razão inversa do tempo de cura [49].

Na fissuração, as fissuras transversais, intrínsecas ao betão armado, formam um caminho rápido de penetração de cloretos na direção das armaduras [50]. Andrade (2001) [22] diz que, na grande maioria dos processos de natureza química, a temperatura age elevando a cinética das reações. Este fato pode explicar o porquê de a maioria das estruturas deterioradas se localizarem em zonas mais quentes [49].

Jensen *et al.* (1999) [51] estudou amostras de argamassas expostas a diferentes temperaturas e concluiu que o aumento da temperatura acelera a penetração de cloretos. Page *et al.* (1981) [44] mostra o aumento do coeficiente de difusão, para diferentes relações A/L, tendo em conta também o aumento da temperatura (Tabela 2-2).

A humidade relativa do ambiente tem um papel fundamental na penetração dos iões de cloreto no betão, uma vez que a humidade dos poros do betão tende a equilibrar com a do meio ambiente e a penetração dos iões de cloreto é influenciada pela humidade no interior do betão [21].

2.2.3. Ensaios de penetração de cloretos

O ensaio em câmara salina é um ensaio comparativo de elevada importância na área da corrosão, visto que consegue simular um ambiente marinho severo. Wolyneć (1992) *apud* Bellei e Lima (2005) [52] comentam que os resultados obtidos por este ensaio nem sempre correspondem aos obtidos em condições atmosféricas reais. Todavia, o ensaio é bastante utilizado devido à sua capacidade de obtenção de resultados semelhantes, em curtos espaços de tempo comparativamente aos ensaios naturais.

Um ensaio utilizado para o estudo da penetração de cloretos consiste em submeter as amostras a ciclos de imersão e secagem. Visto ser um ensaio não normalizado, podemos ter por base de estudo os ensaios realizados por CASTRO *et al.* (2001) [29] e Meira (2004) [34], com diferentes condições de exposição, variando a concentração das soluções de molhagem e os períodos de molhagem e secagem. Num período inicial da molhagem, os cloretos dissolvidos na solução penetram no betão por absorção capilar, sendo alguns transportados para o seu interior por

difusão. Durante o período de secagem os cloretos que penetraram no betão, permanecem no seu interior e são fixos por adsorção juntamente com moléculas de água, formando uma película que reveste o interior dos poros (Figura 2-6) [2].

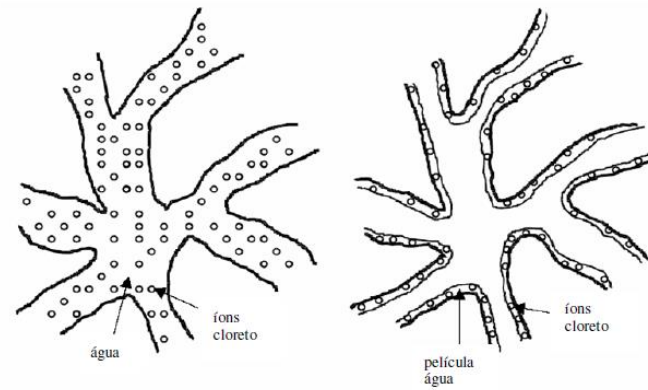


Figura 2-6 – Penetração de cloretos através do ensaio de molhagem, à esquerda, e secagem, à direita [17].

Nos períodos de molhagem seguintes e com a penetração de mais solução nos poros, os cloretos ainda não difundidos no interior do betão provocam um aumento da concentração de cloretos na superfície dos poros sendo assim o processo de difusão mais intenso no seu interior. Na Figura 2-7 é apresentado o perfil de cloretos para a situação de humidade relativa e para a situação dos ciclos de molhagem e secagem.

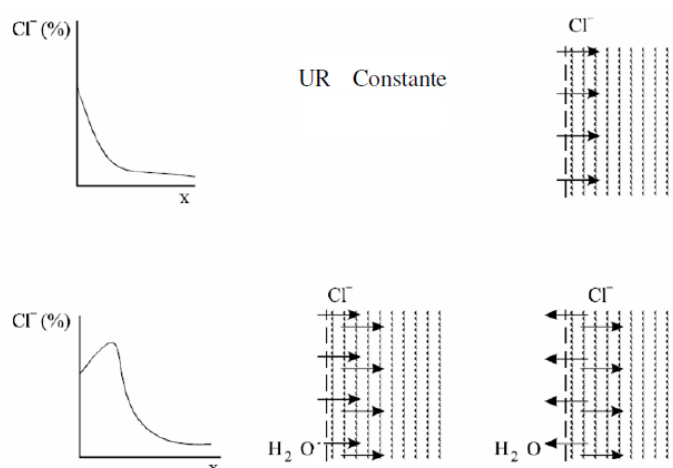


Figura 2-7 – Simulação da penetração de cloretos em ambiente com humidade relativa constante e a ciclos de molhagem e secagem [17]

A difusão natural é outro dos ensaios de penetração de cloretos, que consiste na aplicação do conceito de difusão sem aplicação de um campo elétrico, de modo a ocorrer a transferência de massa entre as regiões de forte e de fraca concentração [2]. Este ensaio é caracterizado pelo seu elevado consumo de tempo, visto que é um ensaio moroso [53] e pode ser aplicado em estados estacionários e não estacionários, sendo a amostra posicionada entre duas células, uma com adição de NaCl e outra sem adição do mesmo, de modo a haver um movimento deste sal através de diferenças de concentração.

Jensen *et al.* (1999) [51] e CERNY *et al.* (2004) [54] utilizam outra forma de aplicação para a difusão natural, na qual a amostra é imersa numa solução de NaCl na quantidade a estudar, sendo uma das faces da amostra deixada livre e todas as outras protegidas, na generalidade por uma tinta epóxi, de modo a não ocorrer por estas a penetração da solução e com o objetivo de simular o fluxo unidirecional.

O ensaio de migração rápida está padronizado pela norma LNEC E 463 (2004) [55] que nos diz que este ensaio consiste na aplicação de um potencial elétrico entre os topos do provete, que vai forçar o transporte de iões cloreto através do provete por migração. Este é um ensaio onde a obtenção de resultados é bastante rápida sendo esta uma das suas grandes vantagens. Anteriormente a ser efetuado o ensaio, o provete deverá ser pré-condicionado, sendo colocado numa câmara de vácuo, estando o procedimento deste mesmo na norma acima referida. Em seguida, o provete é introduzido numa manga de borracha, de modo a não haver troca das soluções anódica e catódicas utilizadas no ensaio. A Figura 2-8 mostra um exemplo da montagem do ensaio de migração.

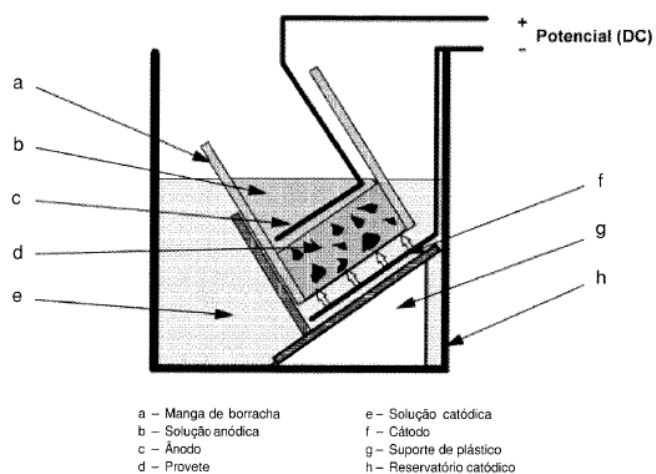


Figura 2-8 – Exemplo da montagem do ensaio de migração [55])

No final do período de ensaio, o provete é partido em duas partes iguais e a secção interior do mesmo é pulverizada com uma solução de nitrato de prata, de modo a ser possível a visualização da penetração de cloretos. Com base na medição efetuada, é possível o cálculo do coeficiente de difusão de cloretos.

2.3. Carbonatação do betão

Designa-se a carbonatação como sendo um fenómeno físico-químico que ocorre devido à penetração de gases ácidos, encontrados no ambiente de exposição da estrutura, e a sua reação com os compostos alcalinos do betão, provenientes da reação de hidratação do betão [56].

Este fenómeno provoca na estrutura carbonatada um decréscimo do seu pH para níveis inferiores a 9, sendo alterada a estabilidade química da película passivadora da armadura, dando início ao processo de corrosão do metal [57].

Dá-se o nome de carbonatação a este fenómeno devido ao facto de o ácido encontrado na maioria das vezes ser o CO_2 [27].

Segundo Andrade (2001) [22], a carbonatação pode provocar a libertação de cloretos fixados na pasta de cimento, provocando assim um aumento dos cloretos livres e, conseqüentemente, da probabilidade do início do processo corrosivo. Dependendo as reações de carbonatação da presença de água, e sendo o betão um material poroso, a velocidade do avanço da frente de carbonatação depende da rede de poros do betão bem como da humidade encontrada nos mesmos [50].

2.3.1. Como ocorre

O CO_2 presente no ar ou em águas agressivas que penetram no betão provocam a ocorrência da carbonatação a partir do momento que este interage com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presente no betão, provocando esta interação uma diminuição drástica do pH da estrutura. Uma pesquisa efetuada por Polito (2006) [41] indica que nem todos os investigadores concordam com os valores a que o pH desce, mas todos concordam com o facto dessa diminuição do pH para valores neutros provocar a despassivação das armaduras e, conseqüentemente, a despassivação das mesmas.

O processo da carbonatação ocorre num conjunto de etapas: inicialmente o CO_2 reage com o hidróxido de sódio (equação (3)) e com o hidróxido de potássio (equação (4)). Segundo Helene

(1993) [27], estas reações alteram as propriedades originais destes hidróxidos, tornando-os enfraquecidos, aumentando a solubilidade do hidróxido de cálcio.



Da interação do hidróxido de cálcio com o CO₂ resulta o carbonato de cálcio (equação (5)), sendo esta considerada a reação principal no processo da carbonatação [56]. A figura 2-10 representa o mecanismo simplificado da carbonatação.

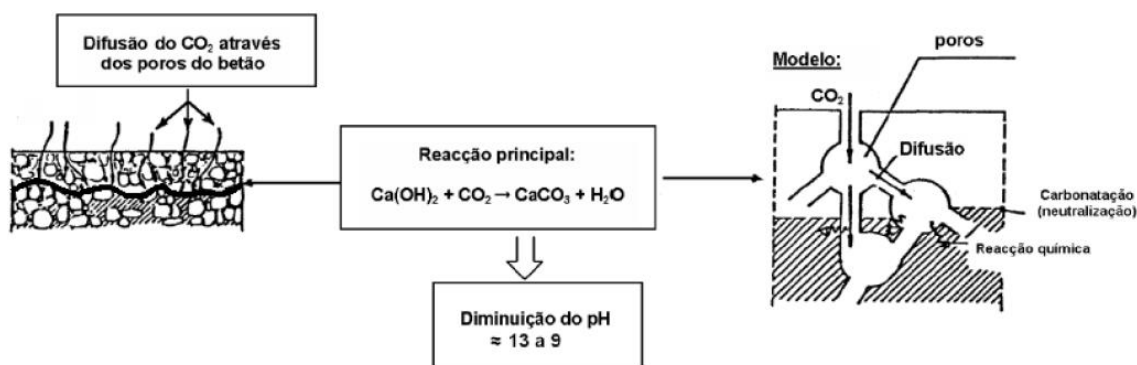


Figura 2-9 – Mecanismo simplificado da carbonatação [30]

Esta reação principal é acompanhada pelo surgimento da frente de carbonatação, a partir do exterior para o interior, sendo esta frente separada por uma zona carbonatada de pH inferior a 9 e uma zona não carbonatada de pH superior a 12. A penetração de CO₂ nos poros do betão diminui com o tempo, porque os poros vão sendo preenchidos com os produtos resultantes da reação da carbonatação e pela crescente hidratação do betão [56].

A figura 2-11 apresenta as zonas envolvidas no mecanismo de carbonatação e a variação do pH ao longo da profundidade.

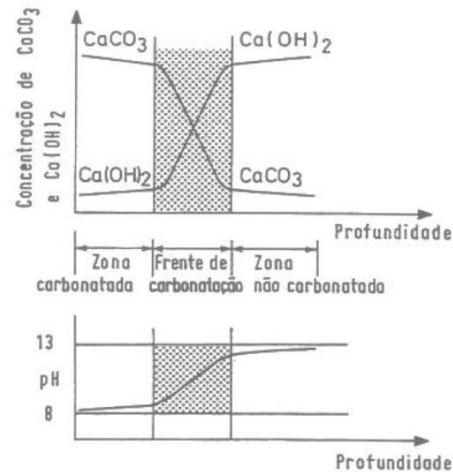


Figura 2-10 - Zonas envolvidas no mecanismo de carbonatação e a variação do pH ao longo da profundidade [30]

Segundo Cascudo (1997) [32], podemos considerar que, em baixas concentrações de CO_2 , a carbonatação será benéfica para o betão, visto que o carbonato de cálcio, produzido pela reação da carbonatação, vai preencher e colmatar parcialmente os poros, nomeadamente os superficiais, tornando o betão mais resistente tanto a nível químico como mecânico.

2.3.2. Fatores que influenciam a carbonatação

A velocidade e profundidade de carbonatação é afetada por vários tipos de fatores, como a humidade relativa do ar, a concentração de CO_2 , o tipo e quantidade de cimento, a relação A/L, as condições de cura, fissuras, entre outros. Tendo em conta estes fatores, a profundidade da carbonatação é muito difícil de prever.

A humidade relativa é um dos principais fatores que afetam a carbonatação no betão, visto que a água tem um papel importante neste processo e, se por um lado, esta bloqueia os poros dificultando o processo de difusão, por outro possibilita a reação entre o CO_2 e o Ca(OH)_2 [2]. Segundo Cascudo (1997) [32], a difusão de CO_2 no meio gasoso é cerca de 10^4 vezes maior do que no meio líquido. Na Figura 2-11 estão representados três casos diferentes correspondentes às condições a que se podem encontrar os poros do betão, sendo o primeiro os poros totalmente secos onde existe a penetração do CO_2 , mas, devido à falta de água as reações de carbonatação não ocorrem. No segundo caso os poros encontram-se totalmente saturados de água, existindo penetração de CO_2 , mas a carbonatação está comprometida devido à baixa difusibilidade. No terceiro caso, os poros encontram-se parcialmente saturados de água, sendo este o caso mais

habitualmente encontrado, sendo que a carbonatação avança até onde os poros mantêm esta condição favorável [2].

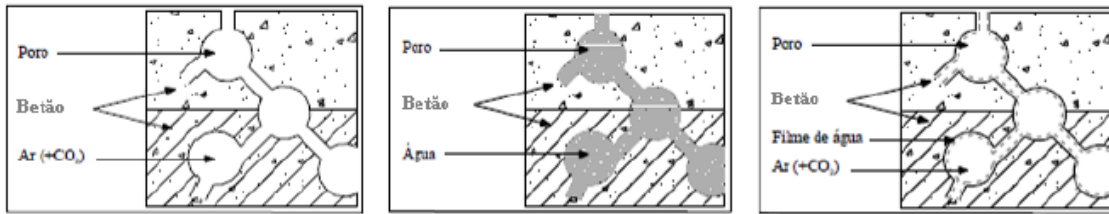


Figura 2-11 – Representação esquemática da difusão de CO₂ [50]

Um estudo realizado por Parrot (1987) [58] permitiu constatar que a taxa de carbonatação máxima é verificada em torno de 60% de humidade relativa. Segundo Helene (1993) [27], as maiores velocidades de carbonatação acontecem em ambientes com humidades relativas entre os 60 e 85%.

A concentração de CO₂ é um fator importante no que respeita à velocidade de carbonatação e quanto maior for esta concentração maior será a velocidade da carbonatação, sendo esta mais gravosa ainda em betões com elevadas razões A/L [56]. Segundo Helene (1993) [27], as condições a que a estrutura é exposta, como a atmosfera envolvente e o microclima, são fatores que influenciam a taxa de carbonatação, variando significativamente estas condições entre os ambientes exteriores e interiores, tendo os ambientes interiores maiores taxas de carbonatação, visto que em ambientes exteriores existe uma constante renovação de ar.

A quantidade de cimento vai determinar a quantidade disponível de substâncias alcalinas no betão, o que significa que quanto maior for a quantidade de cimento utilizada, também maior será a quantidade de substâncias alcalinas e, por sua vez, menor será a velocidade de carbonatação [25]. Os betões constituídos por cimento Portland e sem adições apresentam uma resistência superior à carbonatação, quando comparados com betões que usam adições em substituição de uma parte do cimento [29].

A relação A/L é um dos principais fatores que influencia a penetração de agentes agressores no betão [56]. A permeabilidade do betão depende da relação A/L, sendo que quanto maior esta for, maior será a permeabilidade do betão, ou seja, provoca uma maior difusão de dióxido de carbono e, conseqüentemente, uma maior velocidade de carbonatação [25].

A cura do betão tem importância para a obtenção de um betão de boa qualidade e, para tal, têm de existir condições de cura estáveis e ideais, para evitar que a água presente na mistura não evapore rapidamente na fase de hidratação, de modo a que os espaços que inicialmente estavam saturados com água sejam ocupados pelos produtos de hidratação [25].

2.4. Betão com cinzas volantes (CV)

As CV são um material fino proveniente da queima do carvão das centrais termoelétricas para produção de energia, sendo que em Portugal existem duas centrais termoelétricas, localizadas em Sines e no Pego [56].

Segundo Camões (2002) [59], as CV são o material pozolânico mais produzido em todo o mundo, sendo que uma parte significativa das mesmas é reutilizada na indústria da construção, mais concretamente no betão. Na indústria da construção, a utilização de CV não é uma novidade e é geralmente tomada como uma forma de reduzir a quantidade de cimento utilizada nos betões [21]. O uso das CV é fundamentalmente considerado numa perspetiva de redução de custos do produto final [59], e reaproveitamento de um resíduo, reduzindo o consumo de cimento Portland e por sua vez o CO₂ libertado para a atmosfera.

Com o tempo e uso das CV as vantagens do uso das mesmas foram se tornando evidentes, sendo que com o uso das CV foram verificadas alterações em algumas propriedades do betão [2].

Quando comparados com os betões compostos apenas por cimento, os betões com CV apresentam uma trabalhabilidade maior para uma mesma razão A/L. Este fenómeno está relacionado com a forma como as partículas de CV preenchem os vazios existentes entre as partículas de cimento (Figura 2-12), tendo este fenómeno o nome de efeito fíler [59].

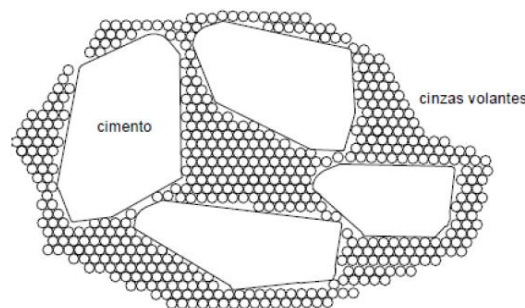


Figura 2-12 – Efeito fíler das cinzas volantes [59]

Após uma exaustiva revisão bibliográfica, Camões (2002) [59] apresenta uma síntese das vantagens do uso das CV no betão, sendo estas a contribuição para a minimização de um problema de impacto ambiental, reduzir o calor de hidratação durante o período crítico em que o calor gerado ultrapassa o dissipado, aumentar a trabalhabilidade do betão, diminuir a exsudação e a segregação e contribuir para melhorar o acabamento superficial, decrescer a permeabilidade, aumentar a economia, possibilitar a obtenção de resistências mecânicas superiores e beneficiar o comportamento dos betões.

A utilização de CV nos betões também tem as suas desvantagens, sendo que Netto (2006) [60] cita algumas delas, como a falta de uniformidade das características das cinzas, a redução do calor de hidratação, a redução dos níveis de hidróxido de cálcio, desenvolvimento de resistências iniciais mais lento e, devido à redução da exsudação, poder ocorrer fissuração provocada pela evaporação de água.

2.4.1. Betão com CV x Penetração de cloretos

Segundo Alonso *et al.* (1994) [7], o aumento da quantidade de aluminatos provocada pela substituição do cimento por CV é o principal responsável pela melhoria da resistência à penetração dos cloretos.

Page *et al.* (1981) [44] avaliaram o coeficiente de difusão de cloretos para pastas de cimento com razão A/L de 0,5, em que utilizaram várias adições, estando entre elas as CV, e verificaram que a presença de CV na mistura não era tão eficiente perante os cloretos como a presença de escórias de alto-forno, mas apresentava uma redução significativa do coeficiente de difusão de cloretos (Tabela 2-3) [21].

Tabela 2-3 – Coeficiente de difusão de cloretos em pastas de cimento com relação a/l de 0.5

[44]

Tipo de cimento	Coeficiente de difusão ($\times 10^{-9} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$)
Cimento Portland	44.7
Cimento com 30% de CV	14.7
Cimento com 65% de Escória	4.1
Cimento resistente a Sulfatos	100.0

Jung *et al.* (2007) [4] realizaram um estudo sobre o coeficiente de difusão de cloretos, onde compararam duas amostras de betão, uma com 0% e outra com 20% de CV, fazendo-as passar por um teste de imersão numa solução de 5% de NaCl, tendo concluído que misturar CV ao betão é uma forma eficaz para a prevenção da penetração de cloretos, sendo que o uso das mesmas aumenta a concentração superficial de cloretos e diminui a quantidade de iões que penetram para o interior do betão [21].

2.4.2. Betão com CV x Carbonatação

Vários investigadores concluem que a presença de CV no betão acelera o processo de carbonatação [61, 62, 63, 64].

São diversos os investigadores que afirmam que a forma como é realizada a mistura das cinzas, se por substituição ou por adição, faz variar o efeito das adições minerais no cimento [2]. No caso de adição de CV, ou seja, sem redução do teor de cimento, há uma diminuição da penetração de CO₂, sendo que sob a forma de substituição do cimento e mantendo a razão A/L, existe um avanço no processo de carbonatação [21].

Se, por um lado, a introdução de CV por substituição provoca nas pastas de cimento um menor teor de hidróxido de cálcio, sendo este um efeito negativo, uma vez que provoca uma diminuição da reserva alcalina do betão e, conseqüentemente, um avanço mais rápido da carbonatação; por outro, modifica a estrutura porosa do betão, dando origem a um refinamento da mesma sendo esta uma mais-valia uma vez que reduz a penetração de CO₂, abrandando assim a carbonatação [3, 21, 49]. A questão é qual a ação que se faz mais sentir, se a vantajosa de refinamento da estrutura porosa compensa a diminuição da alcalinidade do meio.

Após uma pesquisa bibliográfica, Monteiro (2010) [6] refere vários autores que demonstram que a ação destes produtos aumenta a velocidade de carbonatação, especificamente em betões com teores de adição superiores a 30%.

Ho e Lewis (1987) *apud* Vagheti (1999) [3] estudaram misturas com 20% e 40% de CV, para as quais utilizaram uma câmara de carbonatação com um ambiente de 4% de CO₂, e concluíram que quanto maior for a percentagem de CV presentes na mistura, maior também será o aumento da frente de carbonatação [2].

2.5. Ação combinada dos cloretos e da carbonatação

Em ambientes naturais, ou seja, cenários reais, muitas das vezes as estruturas de betão estão sujeitas à ação simultânea de vários tipos de mecanismos de degradação. Para Backus *et al.* (2012) [65], a ação combinada da carbonatação e da penetração de cloretos no betão correspondem a mais de 50% dos casos de deterioração de estruturas de betão. Ramezaniapour *et al.* (2014) [66] diz também que a ação combinada da carbonatação e da penetração de cloretos é a situação de degradação do betão mais provável, em especial em ambientes marinhos (Figura 2-13).

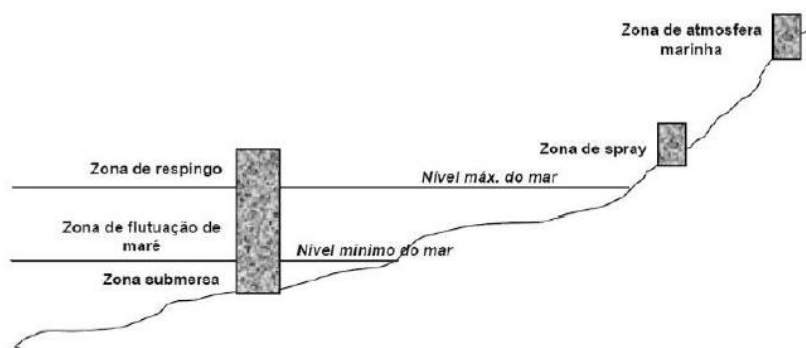


Figura 2-13 – Representação esquemática das zonas de agressividade em ambiente marinho [34]

Na zona de atmosfera e na zona de respingo, zonas em que os teores de humidade podem provocar na estrutura o desenvolvimento da carbonatação, a ação combinada da carbonatação e dos iões cloreto pode ser de grande importância para a durabilidade da estrutura [21].

Segundo Costa e Appleton (2001) [31], na costa portuguesa existem estruturas que apresentam uma deterioração acentuada nos primeiros 5 a 10 anos de vida da estrutura. Os mesmos autores afirmam que a corrosão do betão é tomada como o principal fator que afeta a durabilidade das estruturas de betão, sendo que, para além de esta ser afetada pela carbonatação ou pela penetração de cloretos, pode ocorrer em determinadas condições de exposição, como referidas em cima, uma combinação destes dois fatores de degradação do betão, tornando assim mais complexo o processo corrosivo.

A difusão de cloretos no betão pode ser diretamente influenciada pela carbonatação, devido ao facto de esta provocar uma alteração microestrutural do betão, que por sua vez, provoca uma

diminuição na quantidade de cloretos que penetram no betão. Em simultâneo, a carbonatação também provoca uma redução do pH do betão, podendo assim libertar os cloretos quimicamente fixados, levando ao aumento da quantidade de cloretos que penetram para o interior do betão [21].

2.5.1. Betão comum

De modo a justificar a ocorrência do aumento da profundidade na penetração de cloretos em estruturas submetidas à ação combinada, muitos autores usam a descrição feita por Kobayashi (1991) [67] para descrever o efeito combinado da carbonatação e da penetração de cloretos, em que este desconsidera o refinamento dos poros causado pela carbonatação [21].

Com base nessa definição de Kobayashi (1991) [67], encontram-se Jung *et al.* (2007) [4] que estudaram a influência da carbonatação na difusão de cloretos no betão, moldando provetes de betão com relações A/L de 0.38 e de 0.42, sobre os quais realizaram ensaios cíclicos com uma duração de 56 semanas. Esses ensaios cíclicos eram constituídos por uma semana de imersão, onde os provetes eram imersos numa solução contendo 5% de NaCl, e por uma semana de secagem em ambiente controlado, definido por 10% de CO₂, uma temperatura média de 40°C e humidade relativa de 60%. Após o fim dos ensaios e sucessiva análise dos resultados através dos perfis de cloretos traçados pelos autores, estes conseguiram concluir que a penetração de cloretos é maior quando este efeito é combinado com a ação da carbonatação, sendo a esta atribuída a causa do mesmo, visto que a mesma provoca a libertação dos iões de cloreto quimicamente fixados.

Leivo *et al.* (2011) [68] também estudaram a influência da carbonatação na difusão de cloretos, tendo moldado provetes de argamassa com uma relação A/L de 0.5, submetidos a 90 dias de cura, dos quais 28 dias em água e 62 dias numa câmara com humidade relativa de 65%. Após a cura, os provetes passaram por um período de carbonatação de 157 dias, expostos à ação de 4% de CO₂ e 65% de humidade relativa, sendo que, após este período, os mesmos foram submetidos à penetração de cloretos através do ensaio de migração. De modo a ter um ponto de comparação do efeito da carbonatação na difusão de cloretos, os autores realizaram ensaios de referência, nos quais apenas fizeram passar os provetes pelo ensaio de migração, não passando estes pela carbonatação. Os resultados obtidos para os provetes que passaram pela carbonatação foram uma penetração de cloretos na ordem dos 12.3 mm e um coeficiente de difusão de cloretos em estado estacionário de $37.6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Para os provetes de referência, houve uma

penetração de cloretos na ordem dos 8.5 mm e um coeficiente de difusão de cloretos em estado estacionário de $24.8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Através dos resultados obtidos, os autores puderam concluir que existe de facto um aumento na profundidade de penetração de cloretos provocado pela carbonatação e, por sua vez, um aumento do coeficiente de difusão de cloretos em estado estacionário.

Para além dos autores apresentados, o efeito da carbonatação foi também estudado por Chengfang *et al.* (2012) [5], em que para tal moldaram provetes de betão, passando estes por um período de cura de 90 dias. Após a cura e um processo de secagem de 48h, os provetes passaram por um pré-condicionamento, em que 5 das 6 faces dos mesmos foram revestidas com parafina, sendo depois estes submetidos à carbonatação em três períodos distintos de 0, 14 e 28 dias. Após o fim de cada período mencionado, os provetes foram submetidos a ciclos de imersão durante uma semana, numa solução de 5% de NaCl, e secagem em ambiente de laboratório durante mais uma semana, até perfazerem um período de 12 semanas. Após a conclusão dos ensaios e de uma análise dos resultados, os autores obtiveram para os três períodos distintos de 0, 14 e 28 dias respetivamente, um coeficiente de difusão de cloretos de aproximadamente $2.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, $3.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ e $6.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, o que permitiu aos mesmos concluir que quanto maior for o período de carbonatação, maior será também o coeficiente de difusão de cloretos.

2.5.2. Betão com CV

A presença de CV tem um efeito benéfico na penetração de cloretos quando esta não ocorre em estruturas de betão não carbonatadas. A presença de CV pode conduzir a profundidades de carbonatação superiores quando comparadas com as profundidades de carbonatação de betões sem a adição de CV. De seguida, são apresentados alguns casos de estudo da ação combinada da carbonatação e da penetração de cloretos em betões contendo CV.

Montemor *et al.* (2002) [69] estudaram a ação combinada da carbonatação e da penetração de cloretos em argamassas com CV, onde para o efeito moldaram provetes com 0%, 15%, e 30% de CV em substituição de cimento. Para o estudo da ação combinada e posterior comparação do efeito da carbonatação na penetração de cloretos, os autores realizaram dois ensaios em paralelo, em que, no primeiro, os provetes foram mantidos numa câmara de carbonatação a uma temperatura de 23°C, humidade relativa de 65% e 5% de CO₂, e que ainda se encontravam expostos a 15% de NaCl em forma de *spray*. No segundo, os provetes foram mantidos em

ambiente de laboratório e semanalmente os mesmos eram expostos a 15% de NaCl em forma de *spray*, tendo ambos os ensaios tido uma duração de 4 meses. Após uma análise dos resultados obtidos, os autores concluíram que a adição de CV em ambientes que permitam a penetração de cloretos e não exista carbonatação do betão, as CV reduzem a penetração dos mesmos, sendo que aquando da combinação desses dois fatores, as CV provocam um aumento da penetração de cloretos, acelerando assim o processo de corrosão do betão armado.

A substituição de cimento por CV no estudo da ação combinada da carbonatação e da penetração de cloretos foi também estudada por Chengfang *et al.* (2012) [5]. Para tal, foram moldados provetes com teores de CV de 0%, 10%, 20% e 30%, passando estes por um período de cura de 90 dias. Após a cura e um processo de secagem de 48h, os provetes passaram por um pré-condicionamento, em que 5 das 6 faces dos mesmos foram revestidas com parafina, sendo depois estes submetidos à carbonatação em três períodos distintos de 0, 14 e 28 dias. Após o fim de cada período mencionado, os provetes foram submetidos a ciclos de imersão durante uma semana, numa solução de 5% de NaCl, e secagem em ambiente de laboratório durante mais uma semana, até perfazerem um período de 12 semanas. Através da análise dos resultados, os autores concluíram que para os provetes que continham CV, o efeito da carbonatação na penetração de cloretos era tanto maior quanto o teor de CV.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1. Introdução

Neste capítulo serão apresentados, de uma forma mais detalhada, todos os procedimentos de ensaio efetuados ao longo do trabalho laboratorial, bem como a definição e caracterização dos materiais utilizados, a preparação dos provetes e os ensaios realizados.

Para o estudo, optou-se por utilizar argamassa porosa, para facilitar a penetração dos agentes agressores, de modo a que os resultados fossem mais expressivos num curto espaço de tempo, com diferentes percentagens de CV, para estudar o efeito combinado da carbonatação e da penetração de cloretos tendo em conta essas percentagens.

Na parte final, são descritos e apresentados os ensaios de migração de cloretos que serviram de base para o estudo da dissertação, ensaios que permitiram, após a comparação de resultados, avaliar de que forma a variação da percentagem de cinzas volantes e do tempo de carbonatação afetaram, ou não, a penetração de cloretos.

3.2. Caracterização dos materiais no estudo

3.2.1. Água

A água utilizada para realização das argamassas e de todos os ensaios e trabalhos necessários para o estudo foi proveniente da rede de abastecimento de água pública de Guimarães.

3.2.2. Cimento

Para a realização da argamassa foi adquirido um cimento proveniente da empresa Secil, com centro de Produção em Leiria na Fábrica de Maceira Liz. O tipo de cimento escolhido foi o CEM I 42.5 R , estando este em conformidade com as especificações da NP EN 197-1 (2012) [70].

As composições químicas, as propriedades físicas e mecânicas do cimento escolhido foram fornecidas pelo fabricante [71] e encontram-se presentes na Tabela 3-1, Tabela 3-2 e Tabela 3-3.

Tabela 3-1 - Composição química do cimento CEM I 42.5R [71]

Composição	Símbolo	%
Perda ao Fogo	-	2,15
Resíduo Insolúvel	-	0,99
Óxido de Silício	SiO ₂	17,85
Óxido de Alumínio	Al ₂ O ₃	4,15
Óxido de Ferro	Fe ₂ O ₃	3,71
Óxido de Cálcio	CaO	65,06
Óxido de Magnésio	MgO	1,85
Sulfatos	SO ₃	3,44
Óxido de Potássio	K ₂ O	0,91
Óxido de Sódio	Na ₂ O	0,28

Tabela 3-2 - Propriedades físicas do cimento CEM I 42.5R [71]

Propriedade	Valor
Peso Específico (g/cm ³)	3,13
Resíduo de peneiração - 45 µm (%)	3,02
Superfície específica de Blaine (cm ² /g)	4133
Água na Pasta Normal (%)	29,1
Início de Presa (Min)	178
Fim de Presa (Min)	232
Expansibilidade	1,06

Tabela 3-3 - Propriedades mecânicas do cimento CEM I 42.5 R [71]

Idade	Resistência à Flexão (MPa)	Resistência à Compressão (MPa)
2 Dias	5,9	34
7 Dias	7,8	46,1
28 Dias	8,9	58,4

3.2.3. CV

As cinzas volantes utilizadas na amassadura foram provenientes da Central Termoelétrica do Pego, em Santarém, da empresa PEGOP Energia Elétrica, S.A., sendo as CV resultado da queima de carvão de origem Sul-Africana e Colombiana.

A composição química das CV foi fornecida pelo Laboratório de Materiais de Engenharia Civil da Universidade do Minho e encontra-se presente na Tabela 3-4.

Tabela 3-4 – Composição química das CV

Composição	Símbolo	%
Óxido de Alumínio	Al ₂ O ₃	22.7
Óxido de Bário	BaO	0.115
Óxido de Cálcio	CaO	1.25
Óxido de Cromo	Cr ₂ O ₃	0.0313
Óxido de Cobre	CuO	0.0116
Óxido de Ferro	Fe ₂ O ₃	12.7
Óxido de Potássio	K ₂ O	3.46
Óxido de Magnésio	MgO	1.55
Óxido de Manganês	MnO	0.117
Óxido de Sódio	Na ₂ O	1.52
Óxido de Níquel	NiO	0.00738
Óxido de Fósforo	P ₂ O ₅	0.250
Óxido de Chumbo	PbO	0.0238
Óxido de Rubídio	Rb ₂ O	0.0289
Óxido de Enxofre	SO ₃	0.785
Óxido de Silício	SiO ₂	53.7
Óxido de Estrôncio	SrO	0.0681
Óxido de Tálcio	TiO ₂	1.59
Óxido de Zinco	ZnO	0.0524
Óxido de Zircónio	ZrO ₂	0.0587

3.2.4. Agregados

Na amassadura foi utilizada uma areia rolada e siliciosa proveniente da empresa Mibal, sujeita a uma análise granulométrica de acordo com a norma NP EN 933-1 (2000) [72], descrita de seguida.

Numa primeira fase, a areia foi colocada numa estufa a uma temperatura de 105°C, sendo esta retirada da estufa aquando da obtenção de uma massa constante, realizando, para tal, pesagens sucessivas efetuadas em intervalos de uma hora, considerando a obtenção de massa constante, a variação da massa obtida ser inferior a 0.1% da massa obtida na pesagem anterior.

Após a secagem em estufa, a areia foi colocada em ambiente de laboratório, de modo, a esta arrefecer e estar à temperatura do laboratório antes da realização dos seguintes processos.

O passo seguinte foi a seleção de um conjunto de peneiros para realização da caracterização da areia, sendo, para tal, selecionados os peneiros, tendo em conta a dimensão máxima das aberturas e o número de peneiros a utilizar, de acordo com a natureza da amostra específica e a precisão exigida para o ensaio. Após a escolha dos peneiros, os mesmos passaram por uma inspeção manual, para verificar se a tela não apresentava irregularidades que pudessem afetar o ensaio, bem como irregularidades visíveis das aberturas das malhas ou restos de amostra de peneirações anteriormente realizadas com os mesmos.

Sendo a máxima dimensão do agregado de 4 mm, e segundo NP EN 933-1 (2000) [72], a amostra utilizada foi de 600g. Sendo os peneiros organizados tendo em conta a sua abertura, a amostra foi introduzida nos mesmos, sendo que de seguida se procedeu a uma agitação manual (Figura 3-1), sendo de seguida efetuada uma agitação mecânica (Figura 3-2).

Terminado este processo, a amostra retida em cada peneiro foi pesada, numa balança de precisão 0.1g, de modo a realizar a caracterização da mesma através desses valores.



Figura 3-1 - Agitação manual



Figura 3-2 – Agitação com auxílio mecânico

Os resultados são apresentados em termos de distribuição da massa em função da abertura da malha dos peneiros, designada esta de curva granulométrica do agregado (Figura 3-3).

O ensaio permitiu também a determinar a máxima dimensão do agregado, $D_{m\acute{a}x}$, definida pela malha do peneiro de menor dimensão, através da qual passa, pelo menos, 90% da massa do agregado, permitiu também a determinação da mínima dimensão do agregado, $D_{m\acute{i}n}$, definida pela malha de maior dimensão pela qual passa uma percentagem inferior ou igual a 5% da massa do agregado, bem como o módulo de finura do agregado, definido pelo quociente da soma das massas retidas acumuladas nos peneiros.

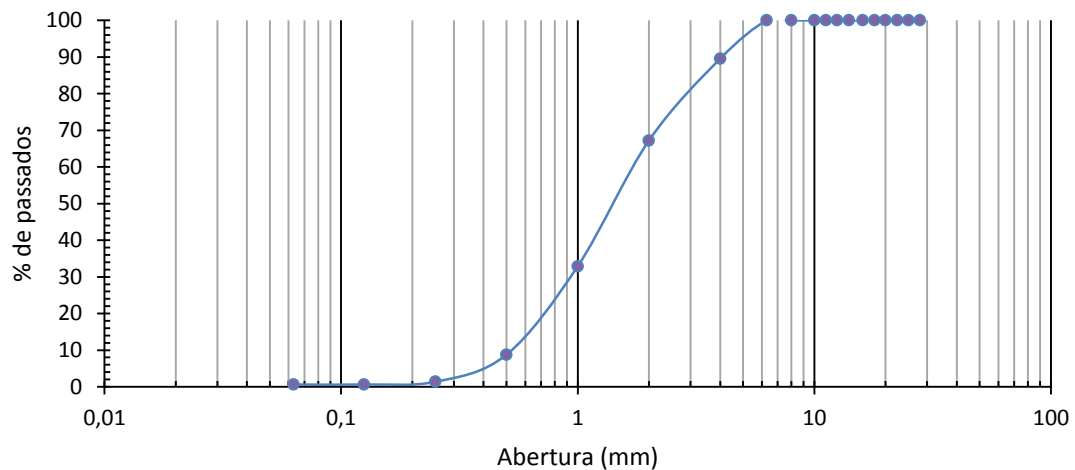


Figura 3-3 - Curva granulométrica do agregado

3.3. Preparação dos provetes

3.3.1. Considerações gerais

Para a preparação dos provetes foi produzida a argamassa com base na norma NP EN 196-1 (2006) [73].

De modo a simular o efeito da carbonatação e do ataque de cloretos em estruturas, foram desenvolvidos para este estudo provetes de argamassa, sendo estes sujeitos a ensaios laboratoriais.

De modo a manter as mesmas condições de humidade em todos os materiais constituintes da argamassa, estes foram condicionados e mantidos em ambiente de laboratório até à sua utilização aquando da produção da argamassa.

Aquando da realização da argamassa e para os materiais não perderem as condições de humidade já referidas, os mesmos foram recolhidos diretamente dos recipientes de armazenamento, sendo estes pesados numa balança de precisão 0.1g de modo a obter as quantidades precisas dos mesmos para a constituição da argamassa.

3.3.2. Produção da argamassa

De modo a que todos os componentes constituintes da mistura estejam disponíveis nas suas corretas proporções, é necessário realizar a sua pesagem previamente, antes do processo de produção da argamassa.

Durante o fabrico da argamassa, foram utilizados vários utensílios, como uma balança, de modo a verificar as proporções corretas de todos os componentes da mistura, recipientes de plástico para transportar a areia, o cimento e as CV até à sua utilização, um recipiente de vidro para a água e uma misturadora mecânica para a mistura de todos os componentes da argamassa.

O misturador mecânico utilizado é constituído por um recipiente de aço inoxidável, onde se realiza a mistura, com uma capacidade de 5L e é equipado de modo ao mesmo ser fixado devidamente à armação da misturadora durante o processo de mistura da argamassa, contendo esta também uma pá misturadora em aço inoxidável.

O procedimento utilizado para a realização da mistura foi o seguinte: em primeiro lugar, foi colocado no recipiente da misturadora o cimento, a areia e as CV para as misturas que continham as mesmas, juntamente com 1/3 da água total necessária para a mistura, sendo, de seguida, ligada a misturadora durante 60 segundos. Após esse tempo, foi desligada a misturadora e adicionada metade da água que sobrou no recipiente de vidro, sendo, de seguida, ligada a misturadora durante 30 segundos, após esse tempo, a misturadora foi desligada e adicionado o resto da água, e, por fim, ligada a misturadora durante 30 segundos.

Em último lugar e com a ajuda de uma espátula, foi revolvida a mistura de modo a verificar se todos os constituintes ficaram corretamente misturados e não ficaram resíduos no fundo do recipiente de aço. O processo descrito foi previamente utilizado e descrito em trabalhos como Raphaele (2013) [2].

3.3.3. Provetes para ação combinada

Para a moldagem dos provetes foi necessário a fabricação de moldes, devido à quantidade de provetes necessários para o estudo, sendo esta superior a 100, e de modo a que todos os provetes tivessem origem da mesma mistura e passassem exatamente por todos os processos de cura e condicionamento dos mesmos ao mesmo tempo, obtendo assim uma maior uniformidade das características dos mesmos.

Os moldes foram fabricados cortando exatamente nas medidas dos provetes a realizar, aproximadamente 50mm de altura, tubos de pvc de diâmetro 100mm, obtendo assim cilindros com duas aberturas, sendo uma destas tapada com fita adesiva de modo a que aquando da moldagem dos provetes a mistura possa ficar dentro dos moldes e assim dar a forma aos provetes.

Após a realização das amassaduras, passou-se à fase de moldagem dos provetes, em que foram moldados provetes cilíndricos para serem submetidos aos ensaios combinados e provetes cúbicos de dimensões $50 \times 50 \times 50 \text{mm}^3$ para determinação das características mecânicas das argamassas.

Nesta fase e aquando da colocação da argamassa nos moldes, foi necessário ter o cuidado de garantir o preenchimento total do molde de modo a garantir uma uniformidade nas dimensões de todos os provetes. De tal modo, a moldagem efetuou-se em duas camadas, tendo o cuidado de minimizar os vazios com ar nos provetes, através de picagem com espátula (Figura 3-4).

Após a moldagem, os moldes foram revestidos por uma película plástica, de modo a evitar a evaporação de água durante a cura inicial da mistura.



Figura 3-4 – Moldagem dos moldes

Após a moldagem, as amostras foram colocadas na câmara húmida durante 24 horas, sendo a temperatura e a humidade relativa controladas, de valor médio de 18°C e 93%, respetivamente.

No fim desse período, os provetes foram retirados dos moldes e colocados dentro de água, na câmara húmida, até às datas de ensaio dos mesmos.

Após um período de cura de 3 meses, os provetes passaram por uma etapa de pré-condicionamento que antecedeu o ensaio de carbonatação.

O pré-condicionamento começa por garantir o equilíbrio entre o provete e o ambiente e, de seguida, uma redistribuição da quantidade de água interna do provete, de modo a que haja uma menor diferença entre a superfície e o interior do provete. Para tal, os provetes estiveram durante um período de 15 dias em ambiente laboratorial, com temperatura e humidade controlada, $23^{\circ}\text{C} \pm 2$ e $70\% \pm 2$, respetivamente.

Terminado este período, os provetes foram revestidos com parafina (Figura 3-5), de modo a que a carbonatação do betão acontecesse unidireccionalmente. Este revestimento consistiu na pintura a quente, em que a face superior e a face laterais foram pintadas, deixando a base por pintar de modo a haver entrada de CO_2 pela mesma. Após o processo de pintura, os provetes repousaram em ambiente laboratorial por 24 horas, sendo, de seguida, introduzidos na câmara de carbonatação.



Figura 3-5 – Provet revestido com parafina

3.3.4. Provetes de Referência

Os provetes de referência passaram exatamente pelo mesmo processo de moldagem e de cura dos provetes para ação combinada, sendo que no pré-condicionamento e, após o período de 15 dias em ambiente laboratorial, de forma a garantir o equilíbrio entre o provete e o ambiente, e haver uma redistribuição da quantidade de água interna do provete, de modo a que haja uma menor diferença entre a superfície e o interior do provete, estes em vez de serem revestidos em

parafina, visto que os mesmos não iriam ser submetidos a carbonatação acelerada foram isolados, sendo para isso os mesmos embrulhados em película plástica transparente.

3.4. Características das argamassas

Para o estudo presente, foram produzidos 4 diferentes composições de argamassas. A única variável nas suas constituições foi a substituição de cimento por uma percentagem de CV, sendo estudadas as percentagens de 0%, 20%, 40% e 60% de CV na amassadura. Para estas amassaduras, foi utilizada uma razão mássica de 1:3 de ligante e areia, ou seja, para cada unidade de ligante foram utilizadas 3 unidades de areia. Para determinação da razão A/L, foi fixado o espalhamento na ordem dos 180mm, para o qual foi utilizado um processo iterativo, sendo adicionados 0.2L de água até o espalhamento pretendido ser alcançado. Na Tabela 3-5 encontram-se as razões A/L para cada tipo de composição.

Tabela 3-5 - Razões A/L para cada tipo de composição

Composição	Razão A/L
0%	0.54
20%	0.51
40%	0.50
60%	0.69

3.4.1. Estado fresco

Com base na NP EN 12350-1 (2009) [74], foi posteriormente realizado o ensaio de abaixamento, de forma a seguir os princípios normativos para as amassaduras.

Este ensaio funciona como um instrumento de controlo de qualidade das amassaduras, sendo possível detetar alterações na composição da argamassa, principalmente nas diferenças de água adicionada na mesma o que se traduz posteriormente na alteração da razão A/L.

Para a realização deste ensaio são necessários três materiais, sendo estes um disco, um molde e um compactador.

Primeiramente, deve-se limpar com um pano e, posteriormente, lubrificar com um óleo de baixa viscosidade a superfície do disco, as superfícies internas do molde, bem como as suas bordas (Figura 3-6).



Figura 3-6 – Superfícies do disco e do molde já lubrificadas

De seguida, o molde foi colocado no centro do disco, sendo a argamassa introduzida no mesmo, para o qual esta foi introduzida em duas camadas. A primeira camada foi introduzida até encher, aproximadamente, metade do molde, onde com a ajuda do compactador foram dadas cinco pancadas sobre a argamassa com o objetivo de a compactar e assegurar o enchimento do molde (Figura 3-7), de seguida foi introduzida a segunda camada, de modo a preencher a totalidade do molde, onde mais uma vez, foram dadas cinco pancadas sobre a argamassa, de modo a compactá-la e uniformizar a mesma no molde.



Figura 3-7 - Compactador

Após o processo descrito, a argamassa no topo do molde é alisada e retirado o excesso da mesma do molde, através do uso de uma espátula e de um pano seco, de modo a assegurar que a superfície do disco se encontra limpa para que nada interfira com o espalhamento.

De seguida, retira-se o molde (Figura 3-8) e inicia-se o processo designado por pancadas, que dando à manivela que faz parte do sistema do disco, este eleva-se verticalmente, caindo subitamente e provocando a compactação da argamassa, este processo dura 15 segundos, sendo a frequência de cada “pancada” aproximadamente um segundo. O objetivo das “pancadas” é a realização do espalhamento da argamassa.



Figura 3-8 – Amostra de argamassa após a retirada do molde

Posteriormente e quando finalizado o processo descrito, é possível medir o espalhamento, através do auxílio de uma fita métrica, sendo esta feita tirando duas medições em direções perpendiculares, obtendo através da média das mesmas o valor do espalhamento (Figura 3-9).



Figura 3-9 – Resultado do processo e medição do espalhamento

3.4.2. Estado endurecido

No seu estado endurecido e de modo a caracterizar o comportamento dos provetes, foi estudada a resistência à compressão dos mesmos.

Para o ensaio de resistência à compressão foi seguido o procedimento descrito em NP EN 12390-3 (2009) [75] e foram utilizados para estes ensaios os provetes de 50x50x50mm³, onde após o provete ter sido cuidadosamente limpo, este foi posicionado de forma cuidadosa o mais centralizado possível para que a carga fosse aplicada perpendicularmente ao mesmo.

A carga aplicada no provete foi constante e com uma velocidade de 2.4 kN/s.

Ao fim da rotura de todos os provetes, estes apresentavam uma forma de prisma que, segundo a norma, é a forma de rotura correta prevista para os mesmos.

3.5. Ensaio acelerados

Para o presente estudo, foram utilizados dois ensaios acelerados de forma combinada, de modo a estudar a influência da carbonatação na penetração de cloretos em betões contendo cinzas volantes. De modo a contribuir para o estudo desta combinação de ações, visto que o mesmo ainda foi pouco estudado, os ensaios acelerados utilizados são apresentados de forma individual e depois de forma combinada.

3.5.1. Difusão de cloretos por migração

O coeficiente de difusão de cloretos é o parâmetro fundamental a definir, de modo a caracterizar a resistência de um betão à penetração dos cloretos.

Para tal e no presente estudo, foi utilizado o ensaio acelerado de difusão de cloretos por migração, de modo a caracterizar a resistência à migração de cloretos das argamassas em estudo, sendo este realizado em regime não estacionário e tendo como base os procedimentos da LNEC E463 (2004) [55].

Optou-se por utilizar um ensaio acelerado para a realização deste estudo, visto que a obtenção de resultados através da exposição natural das amostras, seria um processo moroso.

De modo a iniciar o ensaio de migração de cloretos, é necessário fazer um pré-condicionamento, o mesmo descrito na LNEC E463 (2004) [55], e que consiste na introdução dos provetes que vão ser utilizados para o ensaio numa câmara de vácuo, para que se proceda ao tratamento por vácuo dos mesmos, sendo que, anteriormente à colocação dos mesmos na câmara, estes devem ser limpos.

Para a realização do tratamento por vácuo, os provetes devem ser colocados na câmara de vácuo com ambos os topos expostos.

Estando os provetes introduzidos na câmara, esta é fechada e, em poucos minutos, a pressão absoluta na mesma é reduzida para valores de 1-5 kPa, sendo esta redução provocada com um auxílio de uma bomba de vácuo.

Durante três horas mantém-se o vácuo na câmara, em que, após esse período e ainda com a bomba de vácuo em funcionamento, uma solução saturada de hidróxido de cálcio é introduzida na câmara até cobrir na sua totalidade os provetes, deixando a bomba de vácuo ligada durante mais uma hora.

Terminado esse período, desliga-se a bomba de vácuo e é permitida a entrada de ar na câmara de vácuo, deixando os provetes imersos na solução e sem vácuo durante 18 ± 2 horas antes de retirar os mesmos desta.

Após o ensaio de vácuo, são preparadas as soluções catódica e anódica, de modo a dar início ao ensaio de migração, sendo a solução catódica uma solução de 10% em massa de NaCl em água, ou seja, 100g de NaCl em 900g de água. A solução anódica é uma solução de NaOH 0.3N em água destilada, mais propriamente 12g de NaOH em 1L de água. Após a preparação das soluções, estas são armazenadas a uma temperatura entre os 20-25 °C.

De seguida foi enchido o reservatório catódico com aproximadamente 12L de solução com 10% de NaCl.

Seguidamente, os provetes foram introduzidos nas mangas de borracha (Figura 3-10) de modo a que as laterais dos mesmos estivessem protegidas das soluções e da penetração de cloretos ser unidirecional e as soluções não se misturarem e, de modo, a assegurar os mesmos, foram usadas duas braçadeiras de aço inoxidável para apertar as mangas aos provetes.



Figura 3-10 – Provetes introduzidos nas mangas de borracha apertados com as braçadeiras de aço inoxidável

Antes da introdução dos provetes no recipiente de ensaio, foi introduzida nas mangas a solução NaOH 0.3N num valor de 300mL de solução para cada manga, de modo a conseguir verificar se as mangas estavam bem apertadas e esta não passaria pelas mangas e se pudesse misturar com a solução catódica.

Após a verificação acima exposta, as mangas com os provetes foram introduzidas no recipiente com a solução catódica sobre o suporte de plástico que se encontra sobre o cátodo de aço inoxidável, inserindo na parte superior da manga um ânodo de aço inoxidável que foi ligada ao polo positivo da fonte de alimentação usada para criar a corrente necessária para o ensaio.

De seguida, foi ligado o cátodo ao polo negativo de fonte de alimentação, sendo assim possível o início do ensaio de migração.

Após o processo descrito, a fonte de alimentação foi ligada com uma voltagem previamente estabelecida de 30V, registando os valores de intensidade da corrente inicial que passa o provete.

Após esse registo e consultando a Tabela 3-6, a voltagem aplicada foi ajustada se necessário.

Tabela 3-6 – Diferença de potencial e duração do ensaio de migração [55])

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

Após o ajuste da voltagem, volta-se novamente a anotar o valor da intensidade, sendo este tomado como o valor da intensidade de corrente de início do ensaio. Regista-se também a temperatura inicial de cada solução anódica com ajuda de um termómetro. Tendo em conta a nova intensidade de corrente inicial, e através da Tabela 3-6, escolhe-se a duração do ensaio. Após a duração do ensaio e imediatamente antes do fim do mesmo, registaram-se os valores da intensidade de corrente e da temperatura e desliga-se a corrente.

Terminado o ensaio, procede-se à desmontagem do provete da manga, em que se inverte o processo já explicado detalhadamente mais a cima. Limpa-se o provete, para remover o excesso de soluções da superfície do mesmo, e procede-se ao seccionamento axial do provete por compressão diametral em duas partes, escolhendo a parte que obtiver a superfície de fratura o mais perpendicular possível em relação aos topos, de modo a efetuar a medição da profundidade de penetração dos cloretos.

Usando uma solução de nitrato de prata $AgNO_3$ 0.1 N, pulveriza-se de imediato a superfície fraturada, de modo a que aconteça a reação dos cloretos com o nitrato de prata, permitindo assim a medição da profundidade de penetração. Esta é possibilitada aquando do aparecimento de um precipitado branco do cloreto de prata, visível na superfície da fratura, que acontece

aproximadamente 15 min após a pulverização. Com a ajuda de um paquímetro digital, registam-se 7 profundidades, conforme a Figura 3-11, das quais se obtém a média de penetração, possibilitando assim o cálculo do coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário dos provetes ensaiados.

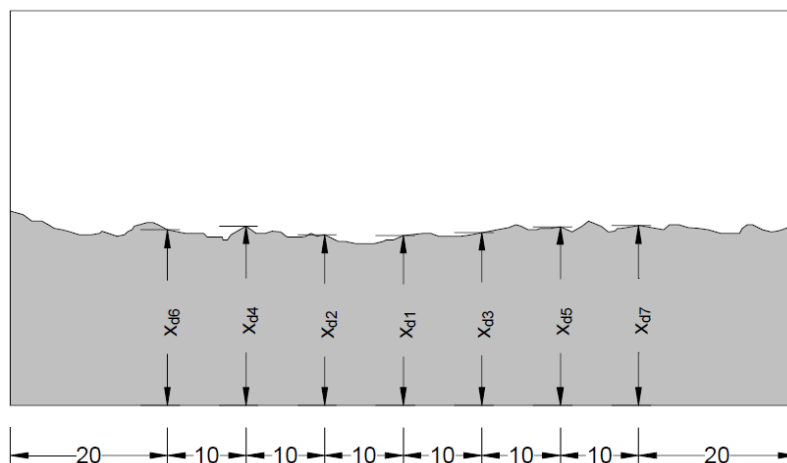


Figura 3-11 – Profundidade de penetração dos cloretos medida em mm [59]

3.5.2. Carbonatação

O ensaio acelerado de resistência à carbonatação consiste na obtenção das profundidades de carbonatação dos provetes em estudo, tendo como base a LNEC E391 (1993) [76].

Os provetes utilizados foram os já mencionados, de dimensão cilíndrica com 100 mm de diâmetro e 50mm de altura aproximadamente.

Para realização deste ensaio e após a cura dos provetes, estes foram submetidos a uma etapa de pré-condicionamento de modo a serem submetidos de seguida ao ensaio acelerado de carbonatação. Para tal, os provetes foram colocados na câmara húmida do Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, onde permaneceram durante um período de 14 dias, até à obtenção de uma massa constante, a uma temperatura de 20°C e 60% de humidade relativa.

Após esta etapa e a estabilização da massa dos provetes, os mesmos passaram por uma etapa de revestimento com parafina.

Este processo consistiu na pintura a quente dos provetes, de modo a que todas as faces dos provetes estejam protegidas, exceto a base dos mesmos pela qual se realizará a entrada de CO_2 . Os provetes foram pintados com a parafina até que todos os poros visíveis nos mesmos se encontrassem preenchidos pela parafina, obtendo assim uma penetração unidirecional do agente agressor (CO_2).

Terminado o processo de pintura dos provetes com parafina, os mesmos repousaram em ambiente laboratorial durante 8h de modo a garantir que a parafina arrefeceu e voltou ao estado sólido, protegendo assim o provete de qualquer tipo de agente agressor.

Findado este tempo os mesmos foram introduzidos na câmara de carbonatação, de modo a serem submetidos ao ensaio acelerado de carbonatação, sendo que esta se encontrava com uma humidade relativa de 50%, a uma temperatura de 20°C e uma concentração de 4% de CO_2 .

Estes permaneceram na mesma até ao tempo de carbonatação previamente definido para o estudo da penetração da carbonatação, sendo que após esse período os provetes foram partidos diametralmente e a face interior do provete foi pulverizada com uma solução alcoólica de fenolftaleína a 0.1%, de modo a que a mesma reagisse com o CO_2 penetrado no provete e fosse possível a realização da medição da penetração do mesmo no provete (Figura 3-12).

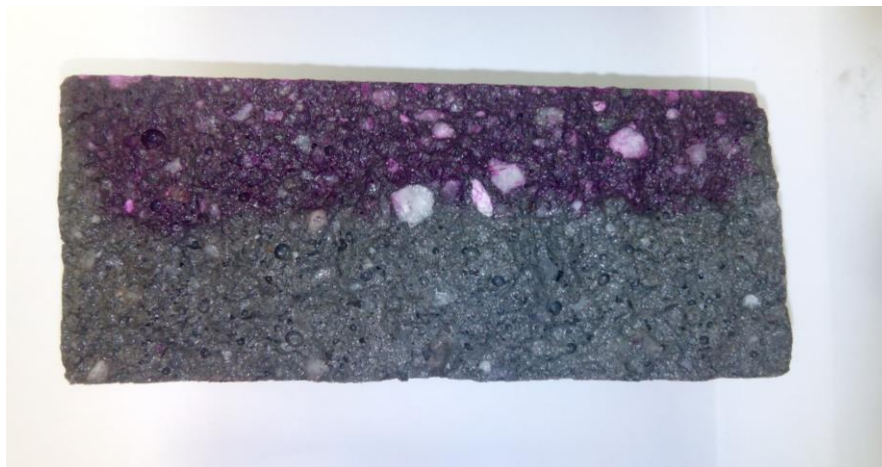


Figura 3-12 – Provete após o ensaio acelerado de carbonatação e pulverização com fenolftaleína

3.5.3. Ação combinada

O estudo da ação combinada da carbonatação e dos cloretos foi o tema central deste trabalho, sendo o objetivo deste estudo a contribuição de mais informação sobre este tema para a comunidade científica, visto a escassez de informação sobre o mesmo.

De seguida, são apresentados os procedimentos utilizados para o estudo do efeito da carbonatação na penetração de cloretos em betões contendo cinzas volantes. Tendo em conta esse estudo, foram estudados dois tipos de situações, uma em que os provetes passaram pelo ensaio acelerado de carbonatação e, de seguida, pelo ensaio de difusão por migração, a qual será descrita de seguida, e outra, chamada de situação de referência, em que os provetes não passaram pelo ensaio acelerado de carbonatação, mas passaram pelo ensaio de difusão por migração, com a finalidade de ter um ponto de comparação e verificar o efeito da carbonatação na penetração de cloretos, sendo que os provetes utilizados para estas situações já foram apresentados anteriormente no presente capítulo.

Para a realização do ensaio combinado foram utilizados 9 provetes de cada composição, 0%, 20%, 40% e 60%, sendo divididos esses 9 provetes de cada composição pelos três tempos de carbonatação.

Sendo assim, após o período de cura dos provetes e tendo em conta a descrição do pré-condicionamento dos provetes e das condições do ensaio de carbonatação, estes foram introduzidos na câmara de carbonatação sendo sujeitos ao processo de penetração de CO₂.

Os provetes permaneceram na câmara durante três períodos de tempo diferentes, tendo estes as durações de: 15, 60 e 90 dias, de modo a estudar a influência da carbonatação na penetração de cloretos.

Após cada período, os provetes foram retirados da câmara de carbonatação, e como estes tinham sido protegidos por uma camada protetora de parafina em todas as suas faces, exceto a sua base, antes de iniciar o ensaio de migração, a parafina teve de ser retirada das faces previamente isoladas pela parafina, como descrito anteriormente, sendo iniciado o ensaio de migração imediatamente a seguir a este processo.

Como descrito neste capítulo no ensaio de migração, as faces dos provetes vão ser expostas a duas soluções durante este ensaio e, de modo a que a penetração dos cloretos pelas mesmas não

fosse afetada pela penetração da parafina nos poros da base superior do provete, esta teve de ser retificada, de modo a garantir que essa face não estivesse contaminada e afetasse o ensaio de migração de cloretos.

O processo de retificação da base superior protegida com parafina consistiu na remoção de cerca de 3 mm de altura do provete com ajuda da máquina de retificação.

Após a retificação dos provetes, estes foram devidamente limpos e introduzidos na câmara de vácuo, de modo a dar ao início do pré-condicionamento do ensaio de migração, já descrito neste capítulo.

Visto que se pretende estudar a combinação dos fatores da carbonatação e da penetração dos cloretos, teve de se ter o cuidado de identificar a face dos provetes pela qual ocorreu a penetração do CO_2 , de modo a que, aquando do ensaio de migração e da introdução dos provetes nas mangas, a face exposta ao CO_2 fosse exposta também aos cloretos, sendo esta exposta à solução catódica e a face retificada exposta à solução anódica, sendo assim estabelecida, devido à ação da corrente elétrica aplicada, uma força de migração dos cloretos da face exposta ao CO_2 para a face retificada.

Finalizado o ensaio de migração, os provetes foram rompidos, como descrito anteriormente, e ambas as metades do provete foram utilizadas para obtenção de resultados, sendo uma metade pulverizada com uma solução de fenolftaleína, de modo a determinar a profundidade de carbonatação e a outra face pulverizada com uma solução de nitrato de prata, de modo a obter a profundidade de penetração de cloretos de modo a determinar o coeficiente de difusão dos mesmos (Figura 3-13).



Figura 3-13 – Metades do provete submetido ao ensaio combinado pulverizadas com as soluções de modo à obtenção de resultados

3.6. Ensaios complementares

Com o objetivo de avaliar e identificar alterações na estrutura porosa das argamassas em estudo, após estas estarem expostas aos agentes agressores, foram efetuados dois ensaios de modo a verificar se, de facto, houve algum tipo de alteração na estrutura porosa das argamassas.

Estes ensaios, além de nos permitirem verificar as alterações na rede porosa provocadas pelos agentes agressores, também permitiram verificar a alteração da mesma, devido à quantidade de cinzas volantes presentes na composição dos provetes.

Para tal, foram efetuados os ensaios de absorção de água por capilaridade e de absorção de água por imersão expostos de seguida.

3.6.1. Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade e todos os seus procedimentos foram seguidos tendo em conta a especificação LNEC E393 (1993) [77], onde a absorção de água por capilaridade é definida como: “a diferença entre a massa do provete de betão endurecido que esteve com uma das faces em contacto com água durante um determinado tempo e a massa do provete seco, dividida pela área da superfície em contacto com a água”, bem como “a altura média da ascensão capilar medida perpendicularmente à face do provete que se encontra em contacto com a água”.

De modo a estudar o efeito da carbonatação no parâmetro da absorção de água por capilaridade foram realizados três ensaios. O primeiro ensaio foi realizado com 3 provetes de cada composição imediatamente após a cura dos mesmos, ou seja, sem estes passarem pela carbonatação. O segundo ensaio foi feito em paralelo com o terceiro. No segundo ensaio, foram utilizados 3 provetes de cada composição, após estes terem passado por 90 dias na câmara de carbonatação, sendo que esta se encontrava com uma humidade relativa de 50%, a uma temperatura de 20°C e uma concentração de 4% de CO₂. No terceiro ensaio, foram utilizados os provetes de referência, os que passaram pela carbonatação natural e, bem como nos outros dois ensaios, foram utilizados 3 provetes de cada composição em estudo.

O ensaio tem início com a introdução dos provetes numa estufa com uma temperatura de 50°C, onde estes irão permanecer durante 14 dias de modo a que os mesmos fiquem totalmente secos, visto que esta característica é necessária para o início do ensaio.

Após os 14 dias em estufa, os provetes foram retirados da mesma, permanecendo em ambiente laboratorial até terem atingido a temperatura ambiente.

Em seguida, a face lateral de cada provete, adjacente à face através da qual vai ocorrer a absorção de água, foram isoladas com silicone ao longo de 15mm de altura.

Tendo os provetes sido preparados para o ensaio, estes foram posicionados em recipientes apropriados, tendo estes sido enchidos cuidadosamente com água até um nível de 5 ± 1 mm acima da face inferior dos provetes, evitando no processo molhar as faces desprotegidas dos provetes (Figura 3-14).

Durante a realização do ensaio, exceto aquando da pesagem dos provetes, o recipiente esteve sempre tapado, de modo a reduzir as trocas de água com o exterior, tendo a preocupação de manter o nível de água no recipiente constante durante todo o processo.



Figura 3-14 – Ensaio de capilaridade em curso

Para a realização do ensaio e quantificação da água absorvida pelos provetes, foram executadas sucessivas pesagens ao longo de 15 dias. Os intervalos de tempo das pesagens estão definidos na Tabela 3-7, tendo estes início no primeiro contacto dos provetes com a água, tendo sempre o cuidado de deixar a água superficial escorrer da face em contacto com a água.

Tabela 3-7 – Frequência das pesagens dos provetes em ensaio de absorção de água por capilaridade

Pesagem	Tempo
1	10 min
2	30 min
3	60 min
4	1h30m
5	2h
6	2h30m
7	3h
8	4h
9	5h
10	6h
11	7h
12	1dia
13	2dias
14	3dias
15	4dias
16	5dias
17	6dias
18	7dias
19	8dias
20	9dias
21	10dias
22	11dias
23	12dias
24	13dias
25	14dias
26	15dias

Terminadas as pesagens, e com base nestas, segundo a especificação LNEC E393 (1993) [77], a absorção capilar num determinado momento, t_i , pode ser calculada, dividindo o aumento da massa $M_i - M_0$, pela área da face inferior do provete em contacto com a água.

3.6.2. Absorção de água por imersão

Para o ensaio de absorção de água por imersão, foi tida como base a LNEC E394 (1993) [78], que define a absorção de água por imersão como sendo a diferença entre a massa do provete de betão endurecido saturado imerso em água e a massa do mesmo provete quando seco.

Para este ensaio foram reutilizados os provetes utilizados no ensaio de absorção de água por capilaridade, visto que para tal só seria necessário proceder à saturação dos mesmos.

Os provetes foram considerados saturados, quando os mesmos alcançaram uma massa constante (m_1), quando a diferença entre duas pesagens consecutivas, num espaço de tempo inferior a 24h, fosse inferior a 0.1% da média das duas pesagens.

Tal como no ensaio de absorção de água por capilaridade, aquando das pesagens, teve-se o cuidado de deixar a água superficial escorrer da face em contacto com a água.

Após os provetes estarem saturados, os mesmos foram pesados imersos em água (m_2).

A massa do provete seco m_3 é a massa do provete medida antes da realização do ensaio de absorção de água por capilaridade, m_1 é a massa constante do provete saturado e m_2 é a massa hidrostática do provete após saturação. Sendo assim, e tendo todos os parâmetros da (3.6) presente na especificação LNEC E394 (1993) [78], o valor da absorção de água por imersão pode ser calculado.

$$A = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \quad (3.6)$$

4. RESULTADOS

4.1. Introdução

Neste capítulo, serão apresentados todos os resultados obtidos através dos ensaios realizados e expostos no capítulo anterior.

Inicialmente, são apresentados os resultados obtidos dos ensaios de caracterização das argamassas. De seguida, são apresentados os resultados obtidos dos ensaios acelerados de carbonatação e da ação combinada da mesma com os cloretos, através do ensaio acelerado de migração. São, também, apresentados os resultados obtidos no ensaio acelerado de migração para os provetes de referência. Por último, são apresentados os resultados dos ensaios complementares, de absorção de água por capilaridade e absorção de água por imersão.

4.2. Caracterização das argamassas

De modo a estudar e caracterizar as argamassas em estudo, foram realizados ensaios de compressão. Para tal, foram realizados estes ensaios aos 7, 28 e 90 dias, sendo que todos os resultados apresentados são feitos a partir dos valores médios de três amostras ensaiadas, estando os resultados expressos em MPa.

Na Figura 4-1 são apresentados os resultados obtidos de forma a visualizar a evolução da resistência à compressão com o tempo para a composição de 0% CV.

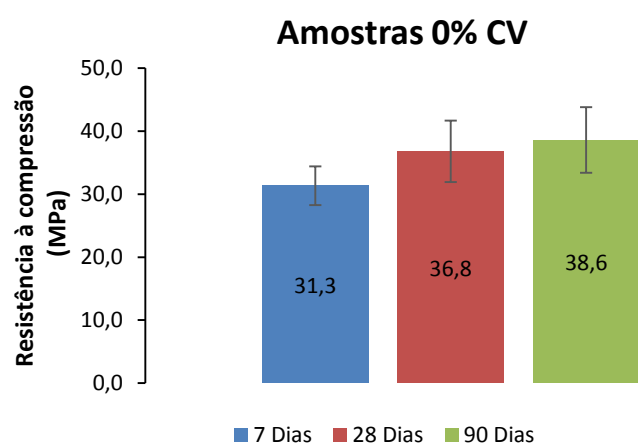


Figura 4-1 – Valores da resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias para os provetes de 0% de CV

Na Figura 4-2 são apresentados os resultados obtidos de forma a visualizar a evolução da resistência à compressão com o tempo para a composição de 20% CV.

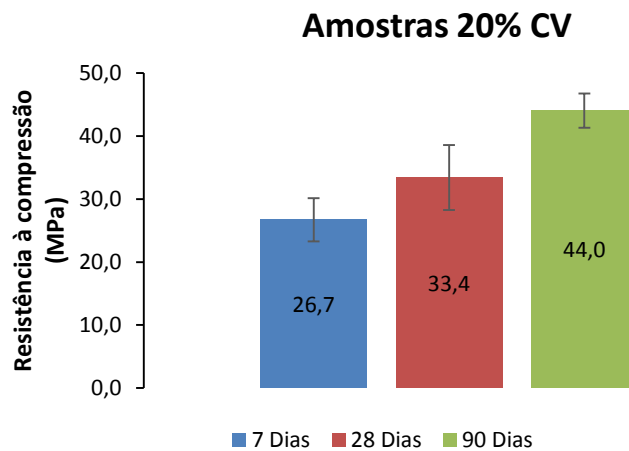


Figura 4-2 - Valores da resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias para os provetes de 20% de CV

Na Figura 4-3 são apresentados os resultados obtidos de forma a visualizar a evolução da resistência à compressão com o tempo para a composição de 40% CV.

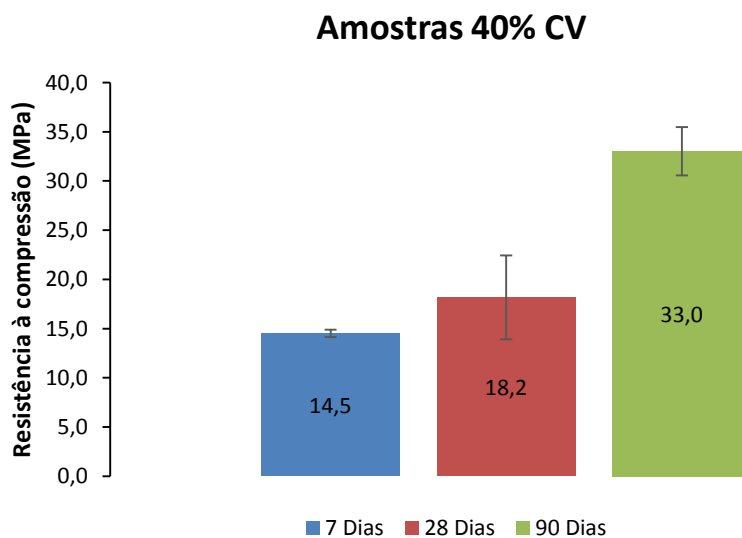


Figura 4-3 - Valores da resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias para os provetes de 40% de CV

Na Figura 4-4 são apresentados os resultados obtidos de forma a visualizar a evolução da resistência à compressão com o tempo para a composição de 60% CV.

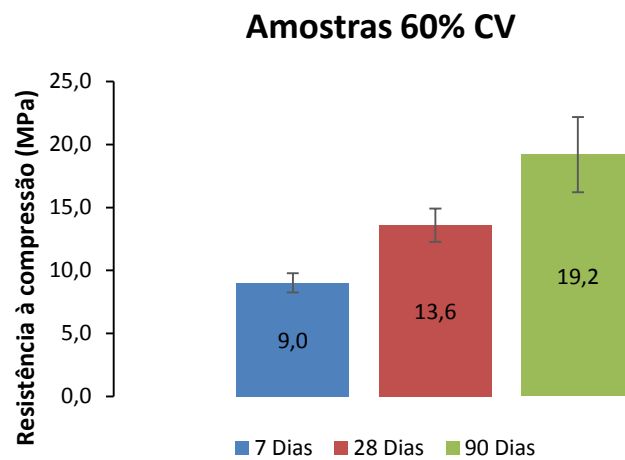


Figura 4-4 - Valores da resistência à compressão aos 7, 28 e 90 dias para os provetes de 60% de CV

Na Figura 4-5 são apresentados os resultados obtidos de forma a visualizar a variação da resistência à compressão das diferentes composições aos 7 dias.

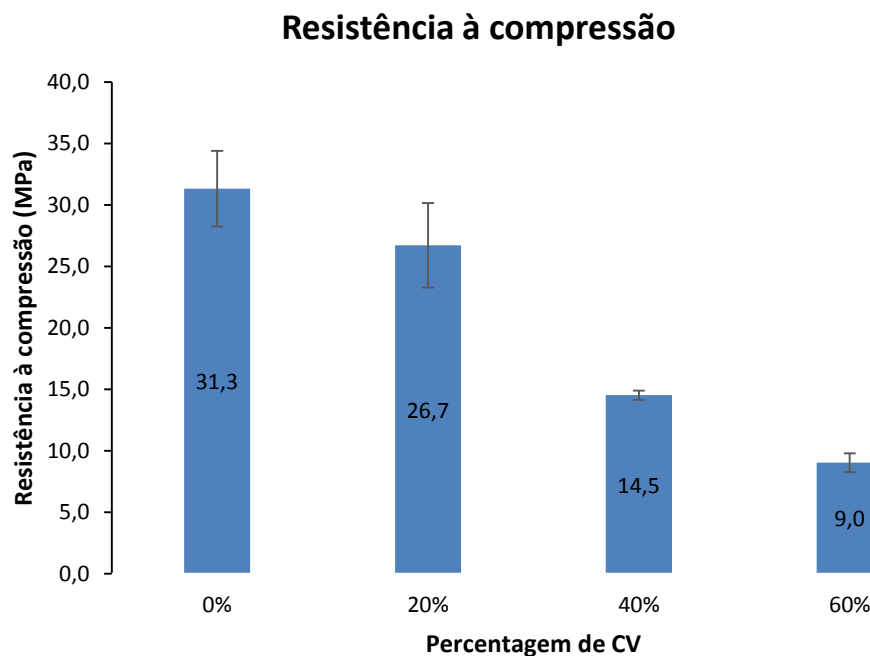


Figura 4-5 – Variação da resistência à compressão aos 7 dias para as diferentes composições

Na Figura 4-6 são apresentados os resultados obtidos de forma a visualizar a variação da resistência à compressão das diferentes composições aos 28 dias.

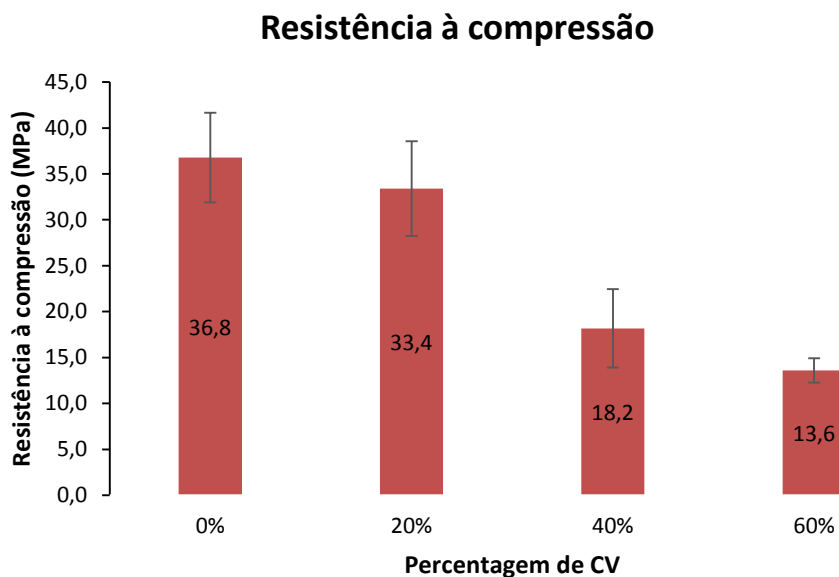


Figura 4-6 - Variação da resistência à compressão aos 28 dias para as diferentes composições

Na Figura 4-7 são apresentados os resultados obtidos de forma a visualizar a variação da resistência à compressão das diferentes composições aos 90 dias.

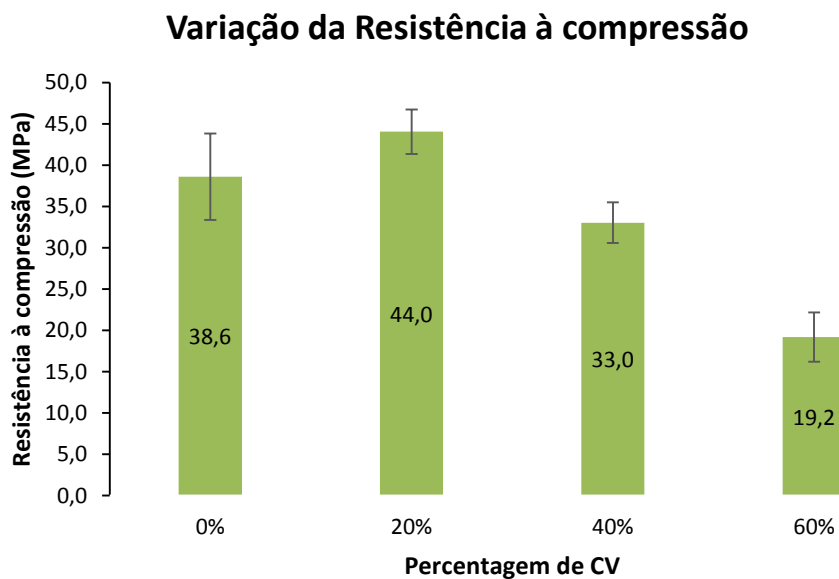


Figura 4-7 - Variação da resistência à compressão aos 90 dias para as diferentes composições

4.3. Ensaio de referência – Migração

Os resultados de seguida apresentados são definidos como o coeficiente de difusão de cloretos obtidos, através do ensaio de migração realizado com os provetes que não passaram pela câmara de carbonatação, estes estiveram envolvidos numa película plástica em ambiente de laboratório, de modo a ter um ponto de comparação para analisar o efeito da carbonatação no coeficiente de difusão de cloretos, estando estes apresentados para cada tempo de estudo e para cada composição em estudo, sendo todos os resultados apresentados em $1 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$.

Na Figura 4-8 é apresentada a variação do coeficiente de difusão de cloretos para cada composição em estudo, dos provetes sujeitos ao período de 15 dias.

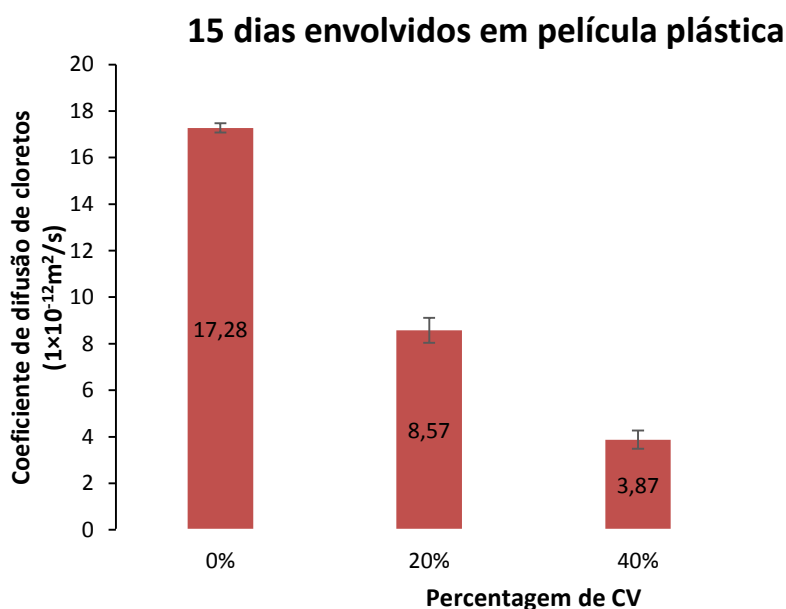


Figura 4-8 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos de cada composição dos provetes após 15 dias em película plástica

Na Figura 4-9 é apresentada a variação do coeficiente de difusão de cloretos para cada composição em estudo, dos provetes sujeitos ao período de 60 dias.

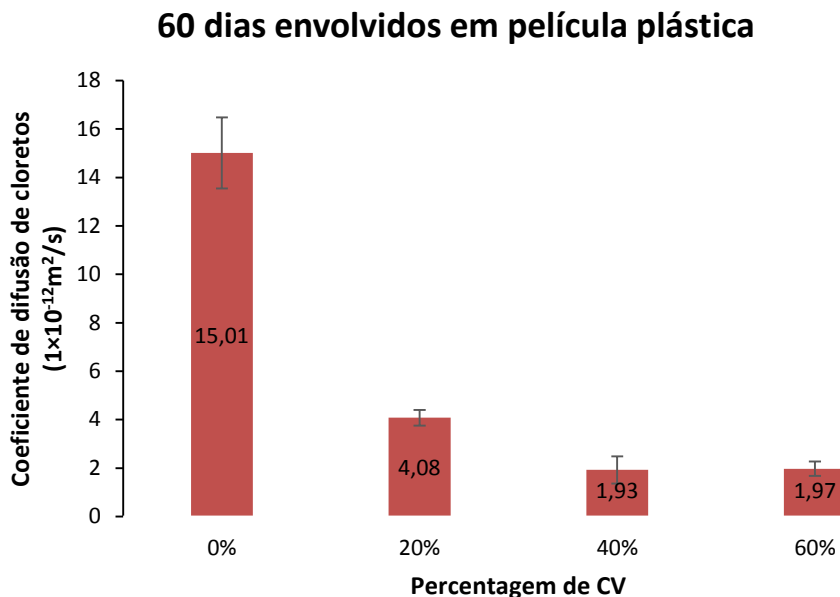


Figura 4-9 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos de cada composição dos provetes sujeitos a 60 dias em película plástica

Na Figura 4-10 é apresentada a variação do coeficiente de difusão de cloretos para cada composição em estudo, dos provetes sujeitos ao período de 90 dias.

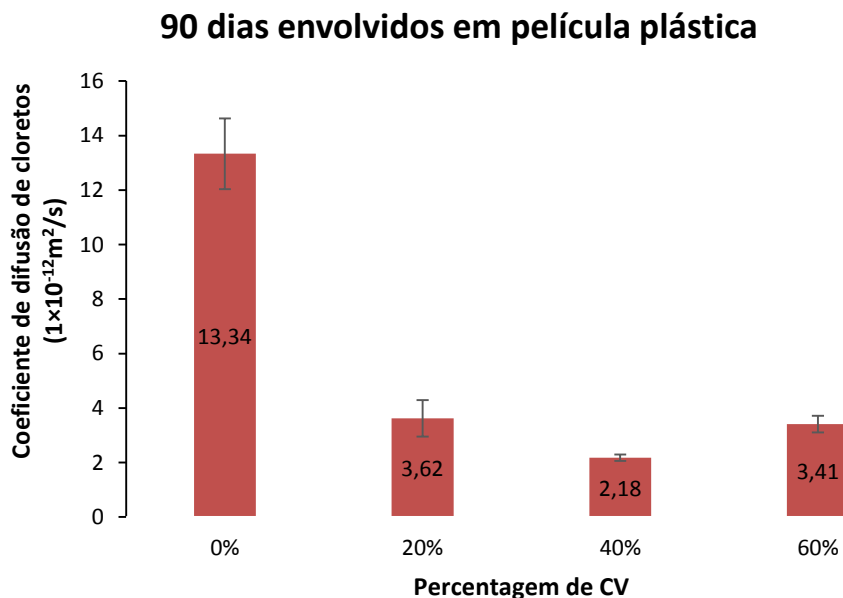


Figura 4-10 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos de cada composição dos provetes sujeitos a 90 dias em película plástica

Na Figura 4-11 é apresentada a variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo, dos provetes de composição 0% CV.

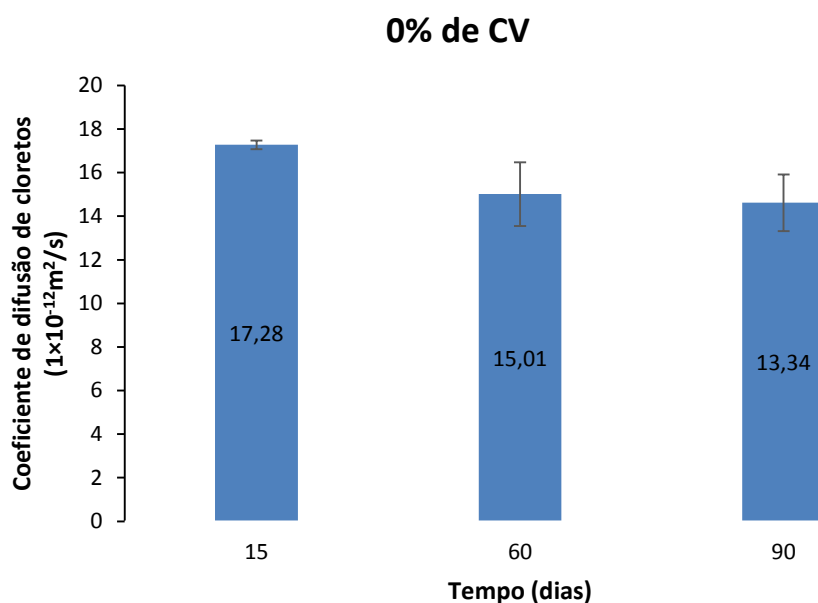


Figura 4-11 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo para os provetes de 0% CV sem carbonatação

Na Figura 4-12 é apresentada a variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo, dos provetes de composição 20% CV.

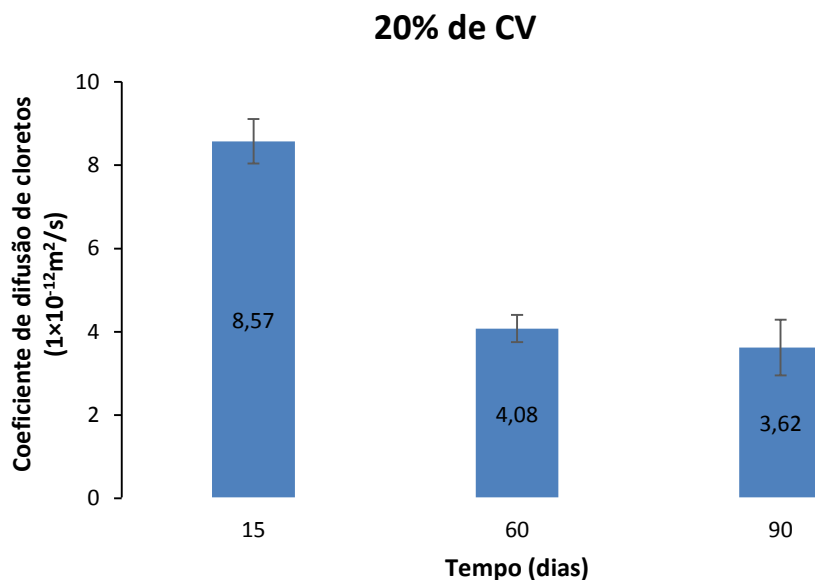


Figura 4-12 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo para os provetes de 20% CV sem carbonatação

Na Figura 4-13 é apresentada a variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo, dos provetes de composição 40% CV.

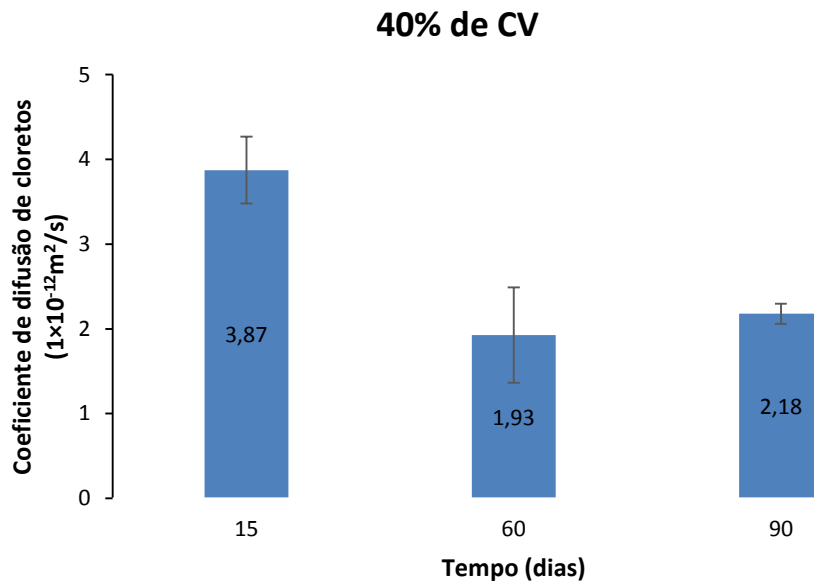


Figura 4-13 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo para os provetes de 40% CV sem carbonatação

Na Figura 4-14 é apresentada a variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo, dos provetes de composição 60% CV.

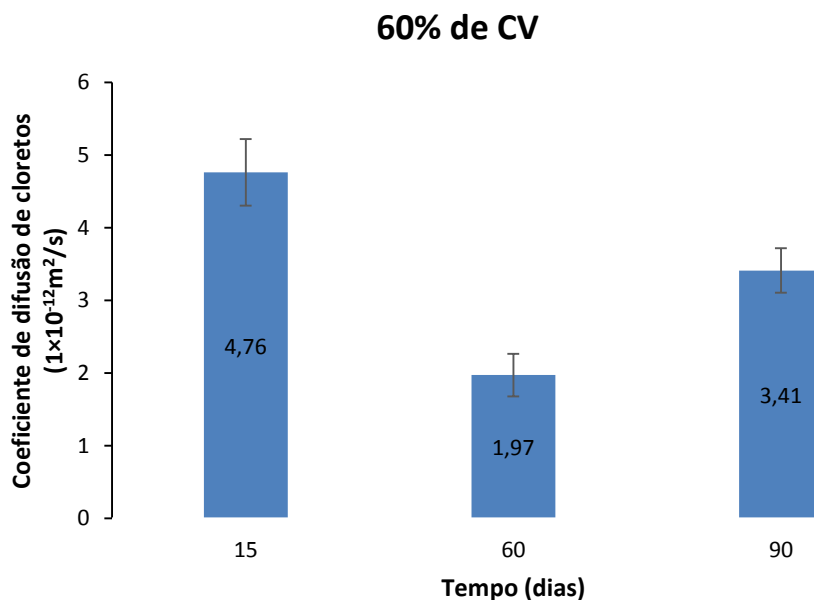


Figura 4-14 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo para os provetes de 60% CV sem carbonatação

4.4. Ação combinada dos agentes agressores

4.4.1. Carbonatação

Os resultados de seguida apresentados são definidos como a profundidade de penetração da carbonatação, estando estes apresentados para cada tempo de carbonatação e para cada composição em estudo, sendo todos os resultados apresentados em mm.

Na Figura 4-15 são apresentadas as profundidades de carbonatação obtidas para cada composição em estudo após um período de carbonatação de 15 dias.

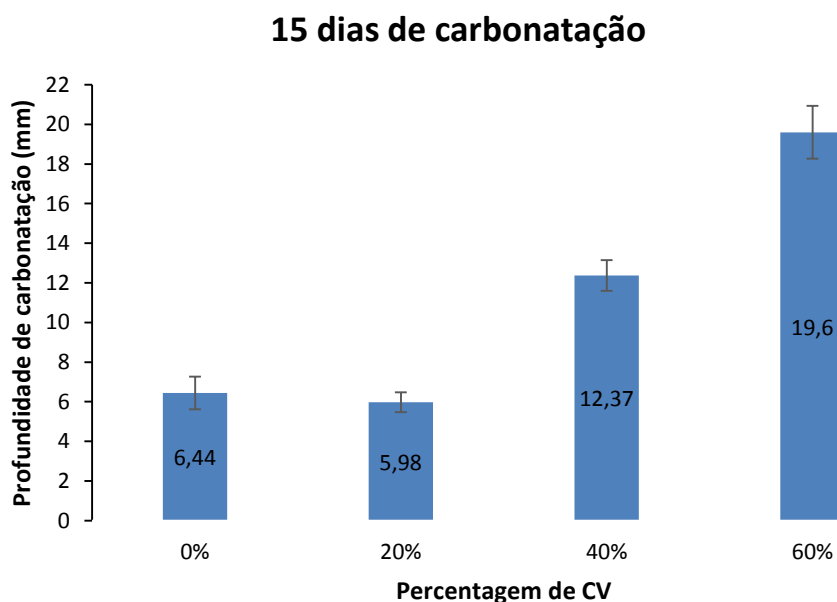


Figura 4-15 - Profundidade da carbonatação para cada composição após 15 dias de carbonatação

Na Figura 4-16 são apresentadas as profundidades de carbonatação obtidas para cada composição em estudo após um período de carbonatação de 60 dias.

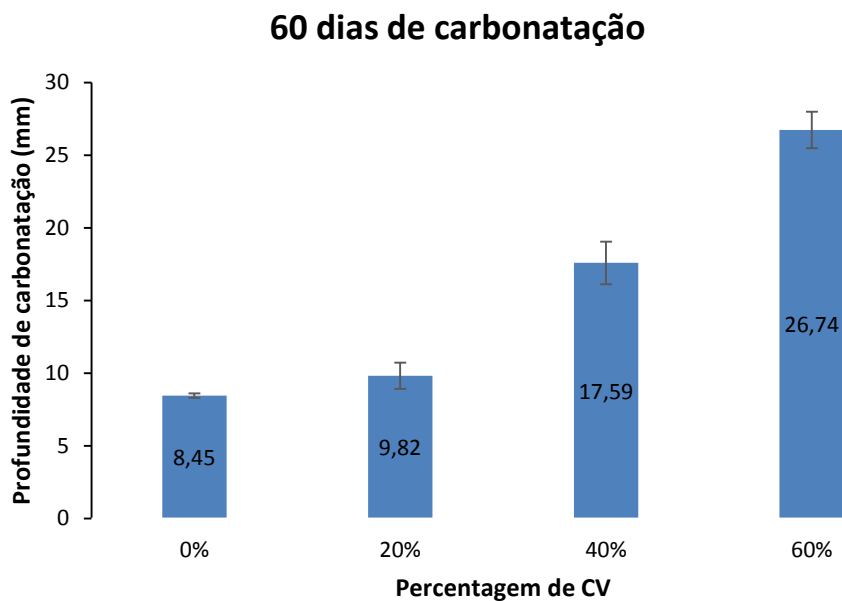


Figura 4-16 - Profundidade da carbonatação para cada composição após 60 dias de carbonatação

Na Figura 4-17 são apresentadas as profundidades de carbonatação obtidas para cada composição em estudo após um período de carbonatação de 90 dias.

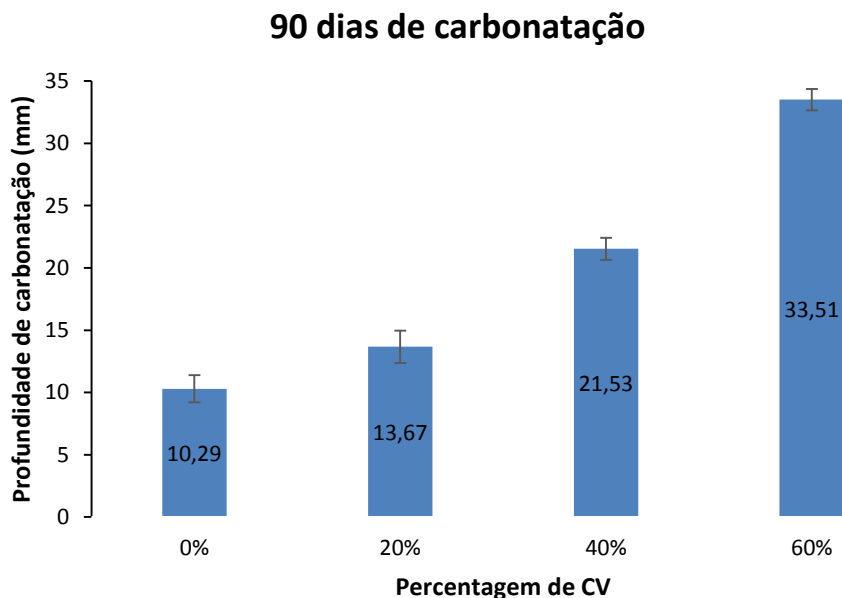


Figura 4-17 - Profundidade da carbonatação para cada composição após 90 dias de carbonatação

Na Figura 4-18 é apresentada a variação da profundidade de carbonatação com os tempos de carbonatação para a composição de 0% CV.

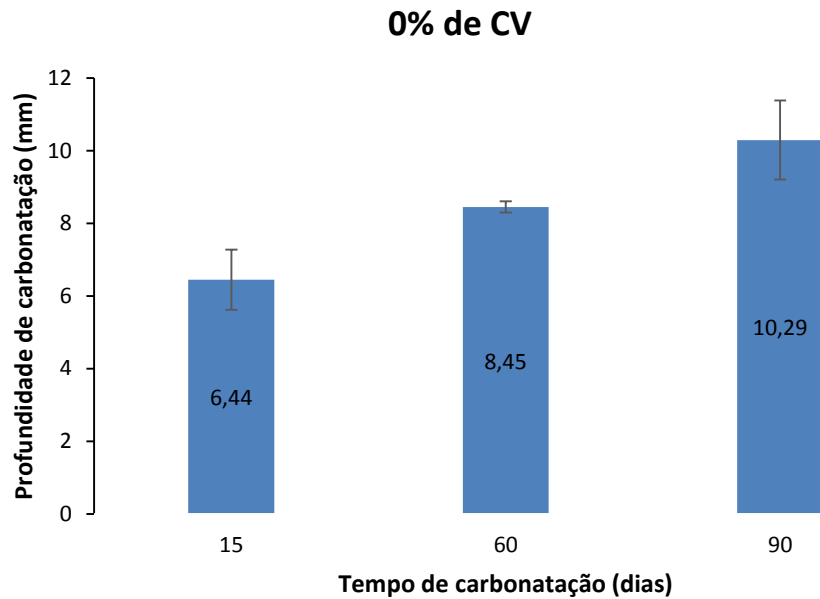


Figura 4-18 - Variação da profundidade da carbonatação com o tempo para a composição de 0% CV

Na Figura 4-19 é apresentada a variação da profundidade de carbonatação com os tempos de carbonatação para a composição de 20% CV.

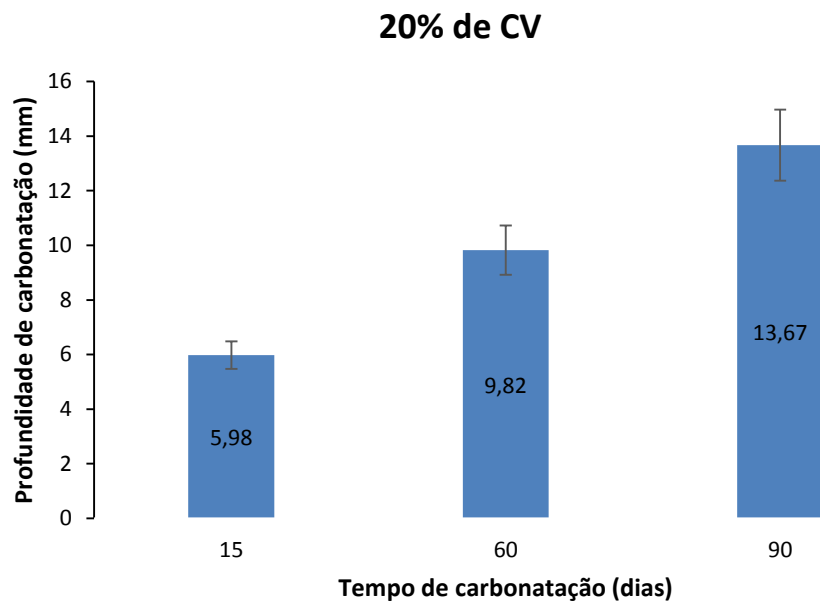


Figura 4-19 - Variação da profundidade da carbonatação com o tempo para a composição de 20% CV

Na Figura 4-20 é apresentada a variação da profundidade de carbonatação com os tempos de carbonatação para a composição de 40% CV.

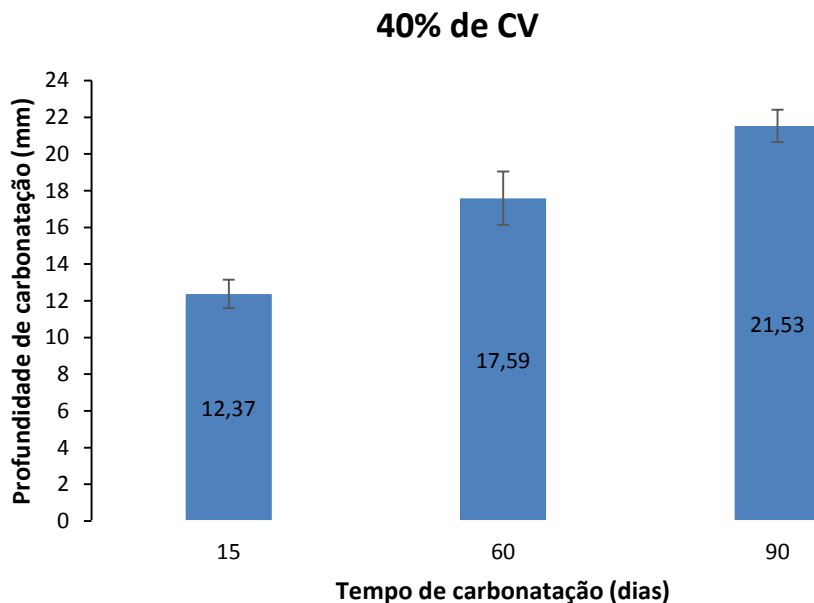


Figura 4-20 - Variação da profundidade da carbonatação com o tempo para a composição de 40% CV

Na Figura 4-21 é apresentada a variação da profundidade de carbonatação com os tempos de carbonatação para a composição de 60% CV.

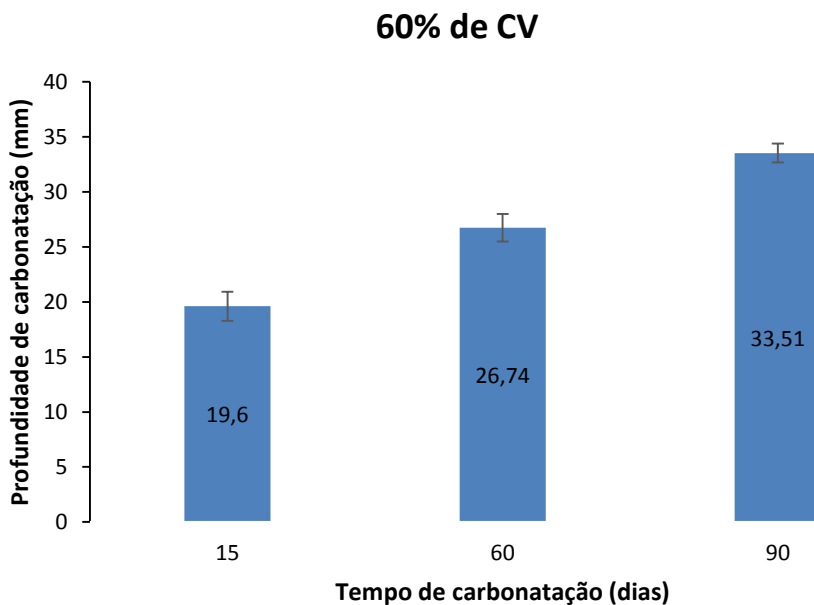


Figura 4-21 - Variação da profundidade da carbonatação com o tempo para a composição de 60% CV

4.4.2. Difusão de cloretos por migração

Os resultados de seguida apresentados são definidos como o coeficiente de difusão de cloretos obtidos através do ensaio de migração realizado com os provetes que passaram pela câmara de carbonatação, de modo a estudar assim a ação combinada desses dois fatores, estando estes apresentados para cada tempo de carbonatação e para cada composição em estudo, sendo todos os resultados apresentados em $1 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$.

Na Figura 4-22 é apresentada a variação do coeficiente de difusão de cloretos para cada composição em estudo, dos provetes sujeitos ao período de carbonatação de 15 dias.

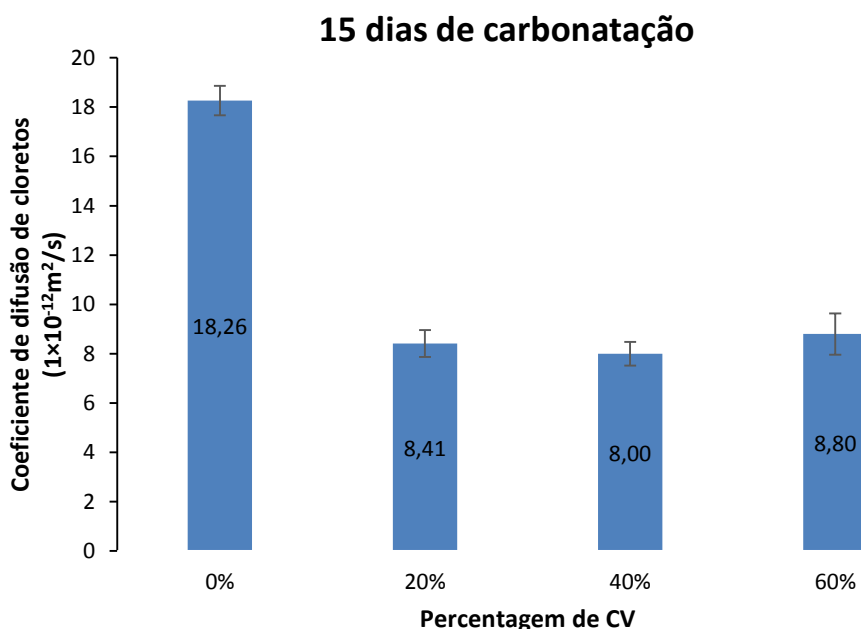


Figura 4-22 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos de cada composição dos provetes sujeitos a 15 dias de carbonatação

Na Figura 4-23 é apresentada a variação do coeficiente de difusão de cloretos para cada composição em estudo, dos provetes sujeitos ao período de carbonatação de 60 dias.

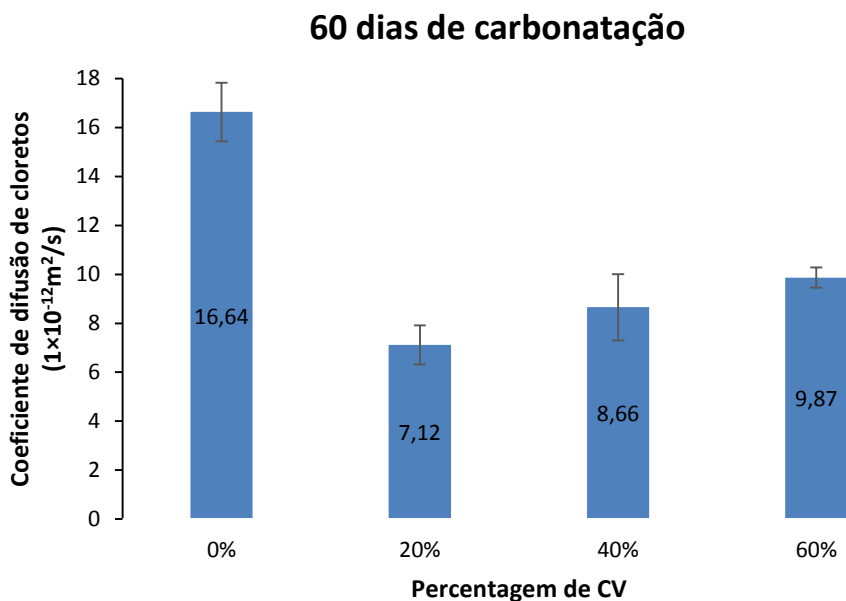


Figura 4-23 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos de cada composição dos provetes sujeitos a 60 dias de carbonatação

Na Figura 4-24 é apresentada a variação do coeficiente de difusão de cloretos para cada composição em estudo, dos provetes sujeitos ao período de carbonatação de 90 dias.

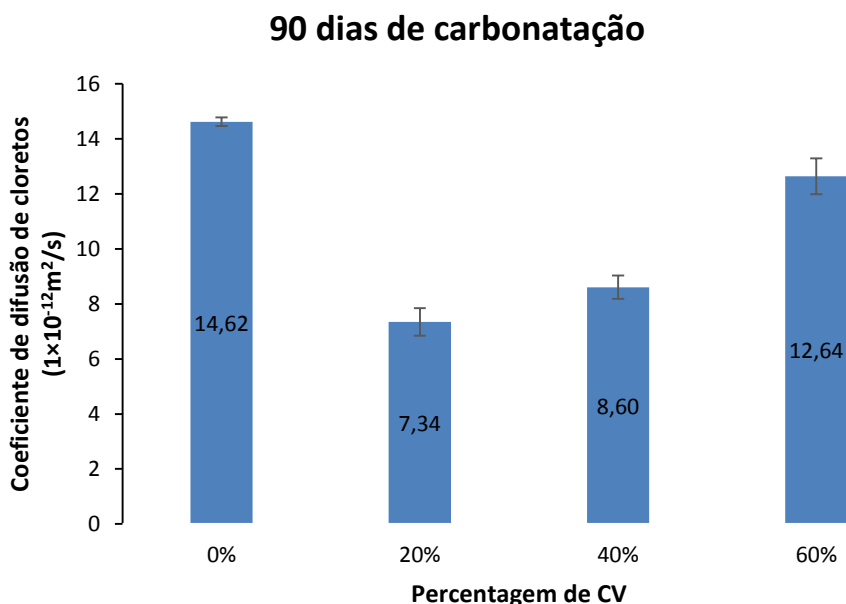


Figura 4-24 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos de cada composição dos provetes sujeitos a 90 dias de carbonatação

Na Figura 4-25 é apresentada a variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo de carbonatação, dos provetes de composição 0% CV.

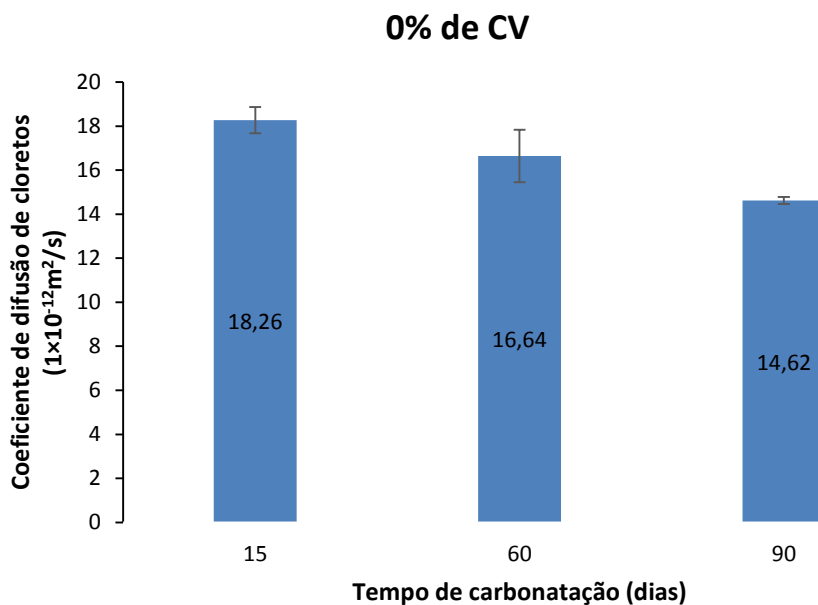


Figura 4-25 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo de carbonatação para os provetes de 0% CV

Na Figura 4-26 é apresentada a variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo de carbonatação, dos provetes de composição 20% CV.

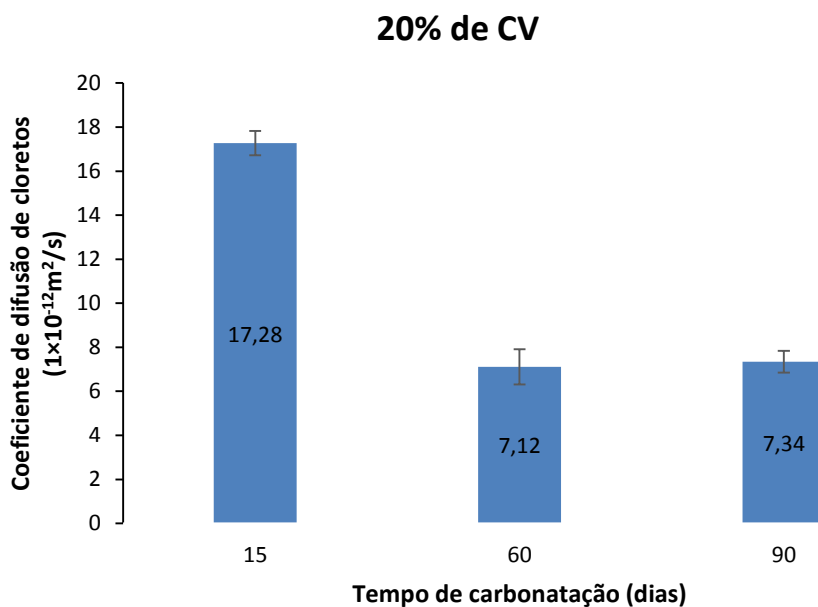


Figura 4-26 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo de carbonatação para os provetes de 20% CV

Na Figura 4-27 é apresentada a variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo de carbonatação, dos provetes de composição 40% CV.

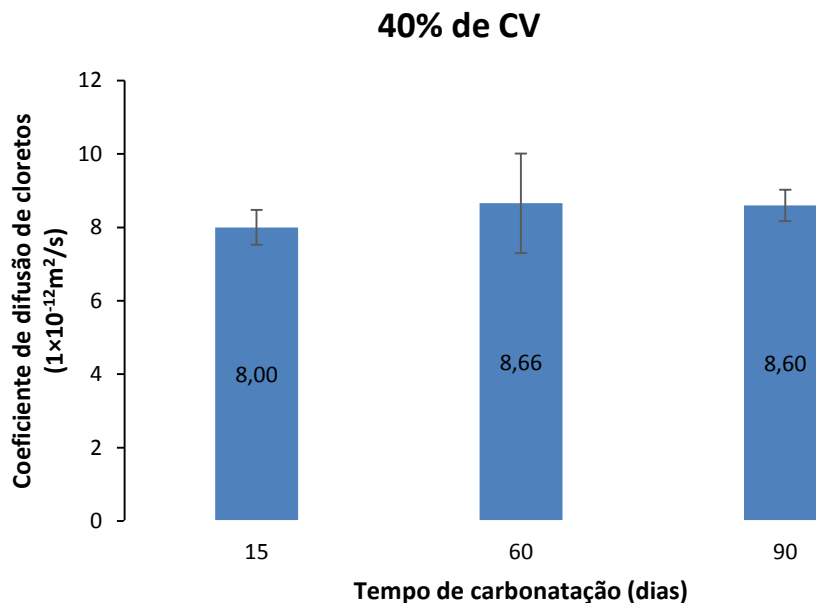


Figura 4-27 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo de carbonatação para os provetes de 40% CV

Na Figura 4-28 é apresentada a variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo de carbonatação, dos provetes de composição 60% CV.

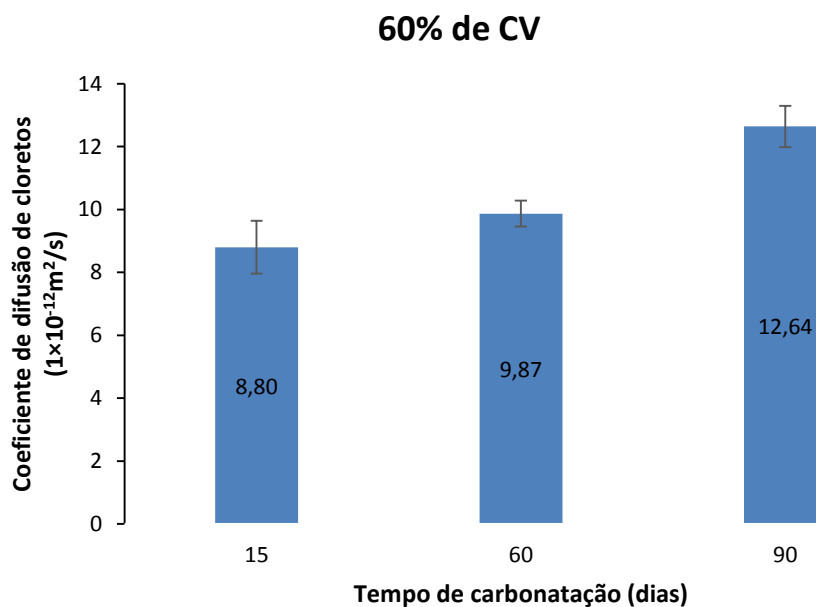


Figura 4-28 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo de carbonatação para os provetes de 60% CV

4.5. Ensaio complementares

Foram realizados ensaios de absorção de água por capilaridade e por imersão em provetes de cada composição logo após os 90 dias de cura, sendo estes os valores de referência para o ensaio. De modo a verificar as alterações na estrutura porosa dos provetes de diferentes composições, foram realizados testes em provetes que passaram por 90 dias na câmara de carbonatação e em provetes que passaram por 90 dias sem carbonatação.

4.5.1. Absorção de água por capilaridade

De seguida, são apresentados os resultados obtidos para a absorção de água por capilaridade dos ensaios realizados para o estudo das alterações da estrutura dos provetes das várias composições em estudo.

Na Figura 4-29 é apresentada a cinética de absorção capilar no período de ensaio de 15 dias para a composição de 0% CV da situação de referência, com carbonatação e sem carbonatação, onde esta é apresentada através da variação da quantidade de água absorvida por unidade de superfície da argamassa em contacto com a água, em função da raiz quadrada do tempo.

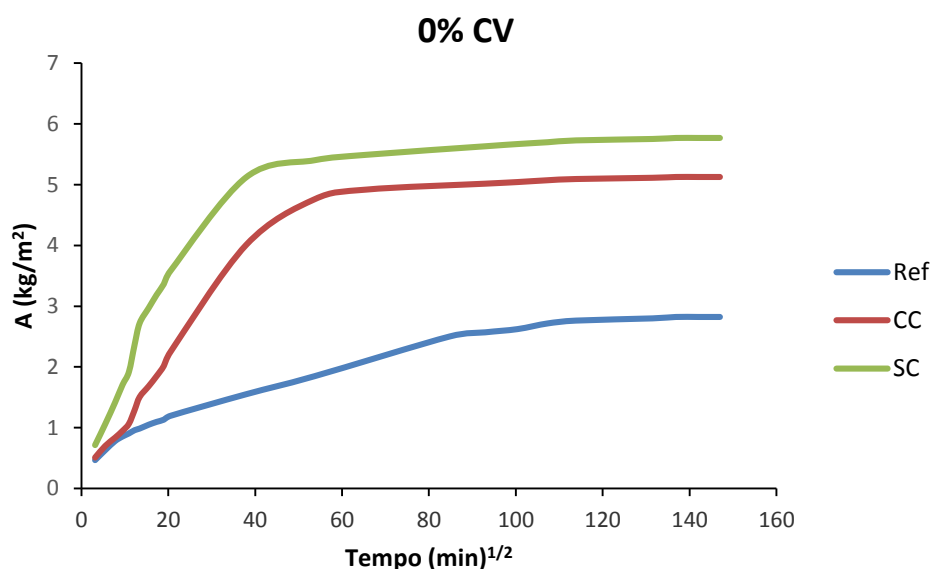


Figura 4-29 - Cinética de absorção capilar para a composição de 0% CV

De modo a determinar a absorção capilar, foi gerada a curva de absorção capilar das primeiras 4 horas de ensaio para a composição de 0% CV da situação de referência, com carbonatação e sem carbonatação (Figura 4-30), através da qual foi formulada a equação da linha de tendência

dessa curva, $y=mx +b$, sendo possível retirar desta o coeficiente de absorção capilar através do valor do declive “m”.

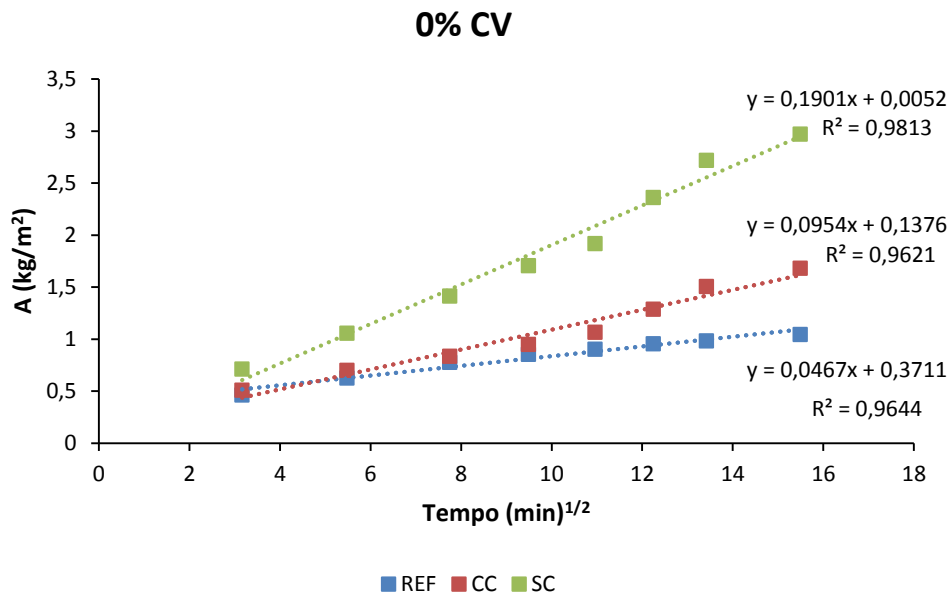


Figura 4-30 - Curva de absorção capilar e respetiva linha de tendência para a composição de 0% CV

Na Figura 4-31 é apresentada a cinética de absorção capilar no período de ensaio de 15 dias para a composição de 20% CV da situação de referência, com carbonatação e sem carbonatação.

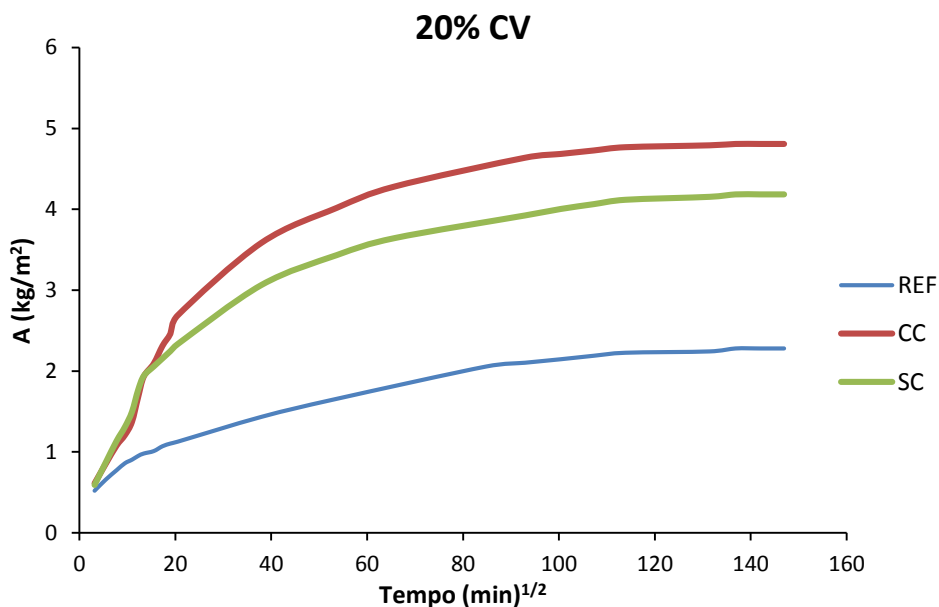


Figura 4-31 - Cinética de absorção capilar para a composição de 20% CV

De modo a determinar a absorção capilar, foi gerada a curva de absorção capilar das primeiras 4 horas de ensaio para a composição de 20% CV da situação de referência, com carbonatação e sem carbonatação (Figura 4-32).

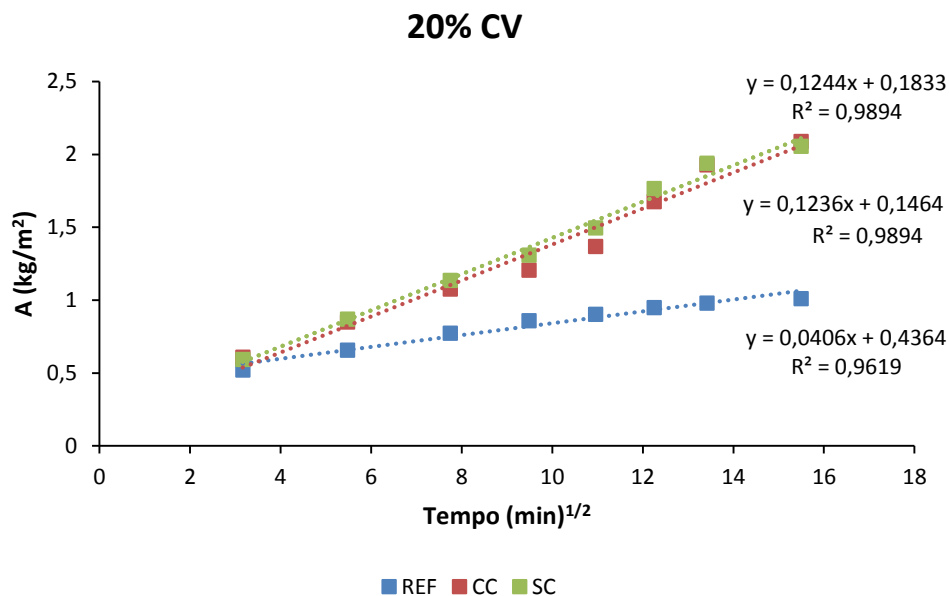


Figura 4-32 - Curva de absorção capilar e respetiva linha de tendência para a composição de 20% CV

Na Figura 4-33 é apresentada a cinética de absorção capilar no período de ensaio de 15 dias para a composição de 40% CV da situação de referência, com carbonatação e sem carbonatação.

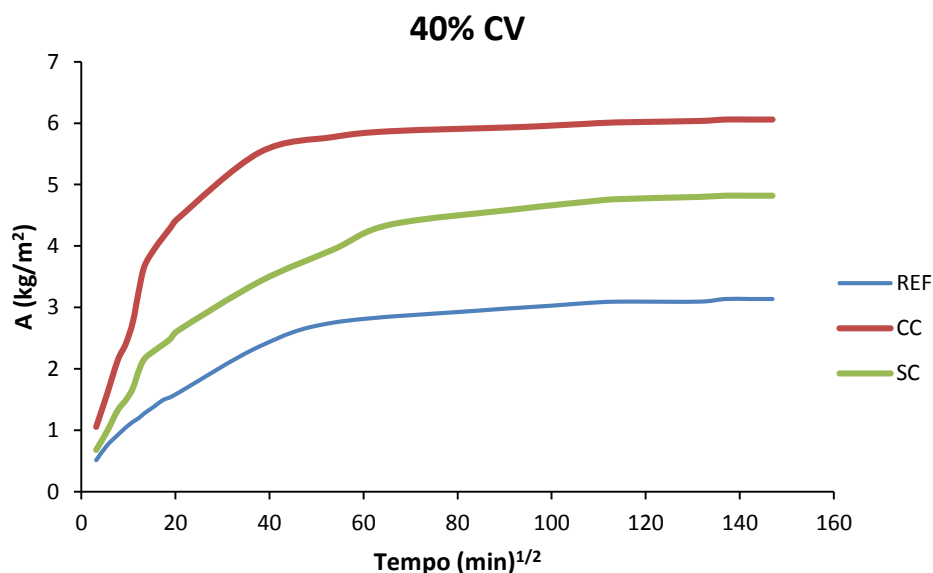


Figura 4-33 - Cinética de absorção capilar para a composição de 40% CV

De modo a determinar a absorção capilar, foi gerada a curva de absorção capilar das primeiras 4 horas de ensaio para a composição de 40% CV da situação de referência, com carbonatação e sem carbonatação (Figura 4-34).

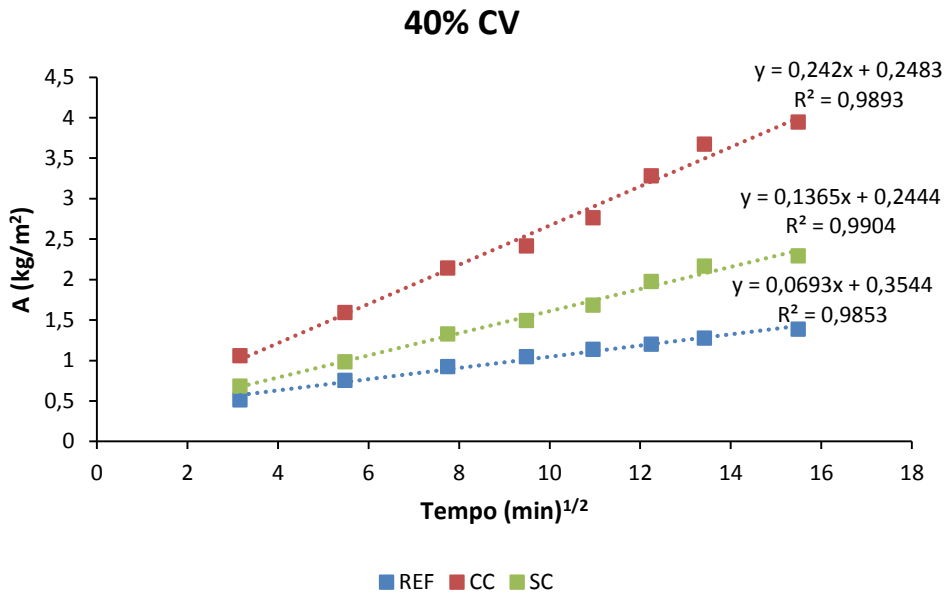


Figura 4-34 - Curva de absorção capilar e respetiva linha de tendência para a composição de 40% CV

Na Figura 4-35 é apresentada a cinética de absorção capilar no período de ensaio de 15 dias para a composição de 60% CV da situação de referência, com carbonatação e sem carbonatação.

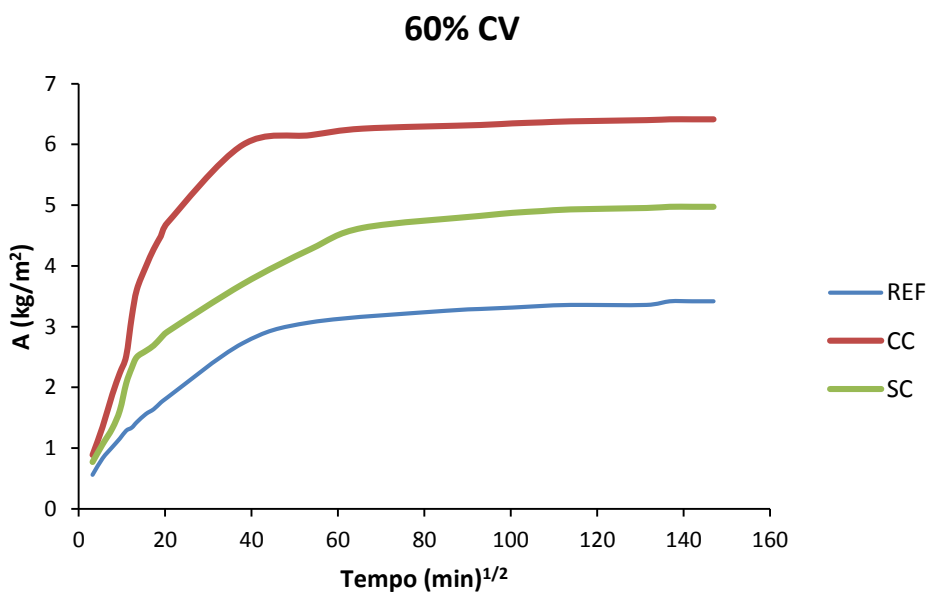


Figura 4-35 - Cinética de absorção capilar para a composição de 60% CV

De modo a determinar a absorção capilar, foi gerada a curva de absorção capilar das primeiras 4 horas de ensaio para a composição de 60% CV da situação de referência, com carbonatação e sem carbonatação (Figura 4-36).

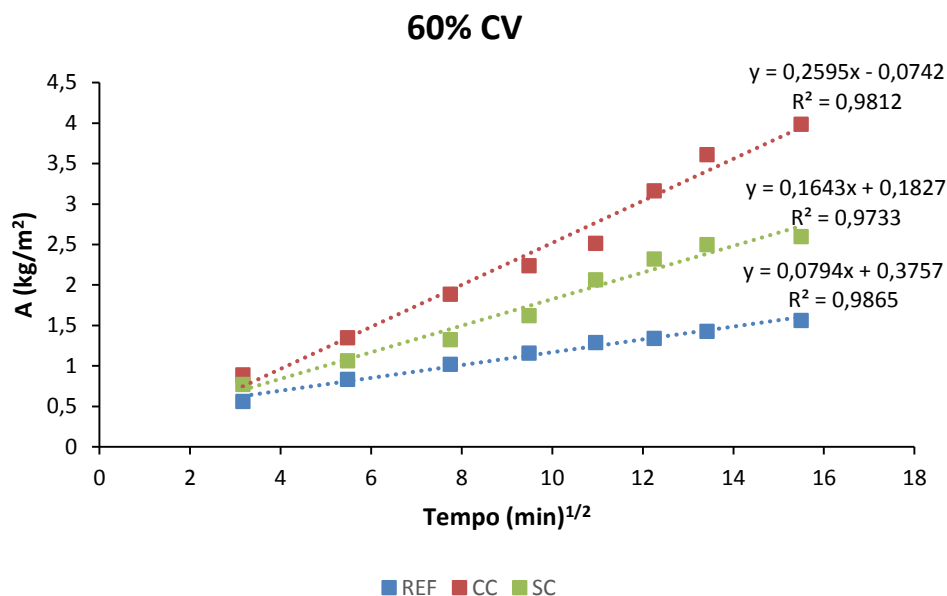


Figura 4-36 - Curva de absorção capilar e respetiva linha de tendência para a composição de 60% CV

4.5.2. Absorção de água por imersão

De seguida, são apresentados os resultados obtidos para a absorção de água por imersão dos ensaios realizados para o estudo das alterações da estrutura dos provetes das várias composições em estudo. Como já referido anteriormente, os provetes utilizados neste ensaio foram os mesmos utilizados nos ensaios de absorção de água por imersão, sendo as situações de estudo a de referência, em que o ensaio é realizado após os provetes saírem da cura, carbonatação natural, em que os provetes ficaram 90 dias em ambiente de laboratório após a cura, e a situação de carbonatação acelerada, aquela em que os provetes estiveram 90 dias na câmara de carbonatação.

Na Tabela 4-1 estão representados os valores das massas dos provetes saturados (m_1), das massas dos provetes saturados imersos (m_2), das massas dos provetes secos (m_3) e valores das absorções capilares para as situações de estudo.

Tabela 4-1 - Valores das massas dos provetes saturados, das massas dos provetes saturados imersos e das massas dos provetes secos e valores das absorções capilares para as situações de estudo

	m1 (g)	m2 (g)	m3 (g)	A (%)
0% referência	1021,20	567,03	980,93	8,87
0% Carbonatação natural	1025,50	565,60	966,37	12,86
0% Carbonatação Acelerada	1029,90	571,50	976,40	11,67
20% referência	1049,77	587,00	1014,90	7,53
20% Carbonatação natural	1018,87	561,60	970,60	10,56
20% Carbonatação Acelerada	1049,07	580,07	998,20	10,85
40% referência	1034,53	575,70	997,70	8,03
40% Carbonatação natural	1045,80	575,80	993,20	11,19
40% Carbonatação Acelerada	1029,33	572,77	966,87	13,68
60% referência	1016,20	563,13	977,27	8,59
60% Carbonatação natural	1017,83	560,50	964,40	11,68
60% Carbonatação Acelerada	1015,03	558,77	948,80	14,52

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são analisados todos os resultados obtidos da realização dos ensaios necessários para o presente estudo.

5.1. Influência das CV sobre o coeficiente de difusão de cloretos

De modo a estudar a influência das CV sobre o coeficiente de difusão de cloretos, na Figura 5-1 são representados os coeficientes de difusão de cloretos de cada composição em estudo, 0%, 20%, 40% e 60%, para cada tempo de estudo, 15, 60 e 90 dias, em que os provetes estiveram embrulhados em película plástica.

Na Figura 5-1 podemos observar que, para todos os tempos em estudo, existe uma coerência no coeficiente de difusão de cloretos entre as diferentes percentagens de CV, sendo que o coeficiente de difusão de cloretos da composição de 0% CV é maior que o da composição de 20% CV, o coeficiente de difusão de cloretos da composição de 20% CV é maior que o da composição de 40% CV e o coeficiente de difusão de cloretos da composição de 60% CV é maior que o da composição de 40% CV. Com base nestes resultados, é possível verificar que a substituição de uma percentagem de cimento por CV é benéfica para a redução do coeficiente de difusão de cloretos, sendo esta mais benéfica para uma substituição de cimento por 40% de CV, como se pode comprovar pelos resultados obtidos.

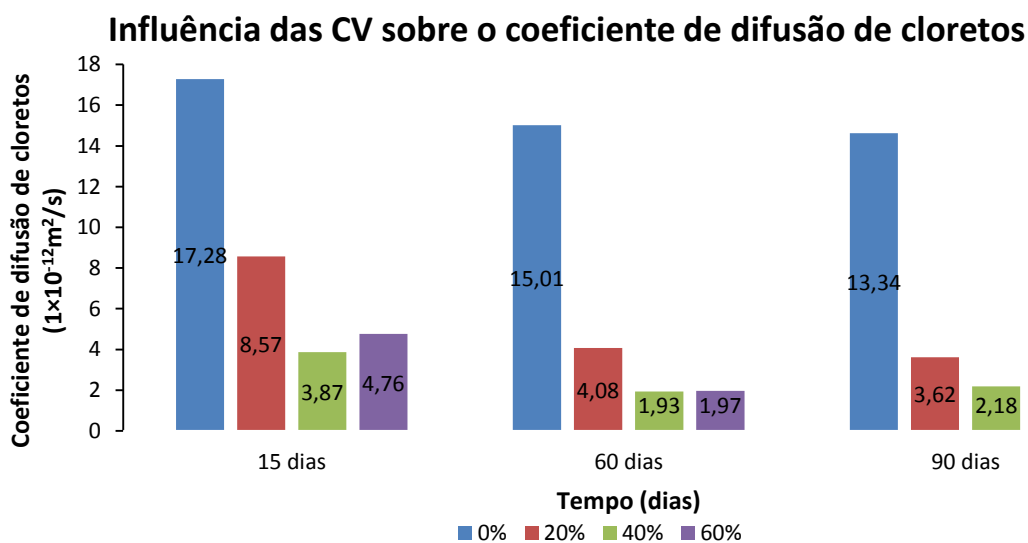


Figura 5-1 - Coeficientes de difusão de cloretos de cada composição em estudo, 0%, 20%, 40% e 60%, para cada tempo de estudo, 15, 60 e 90 dias

5.2. Influência da carbonatação sobre o coeficiente de difusão de cloretos

De seguida, é analisada a influência da carbonatação sobre o coeficiente de difusão de cloretos, tendo em conta o uso ou não de CV, de modo a verificar se o uso desta adição afetará a carbonatação e, conseqüentemente, o coeficiente de difusão de cloretos.

5.2.1. Sem CV

Na Figura 5-2 está representada a variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo de carbonatação acelerada e sem carbonatação para os provetes de 0% CV. Por observação desta figura, pode verificar-se que com carbonatação e sem carbonatação o coeficiente de difusão de cloretos diminui, sendo possível verificar que a carbonatação acelerada afetou o coeficiente de difusão de cloretos, visto que aos 15, 60 e 90 dias este valor é maior que o valor dos provetes que não passaram pela carbonatação.

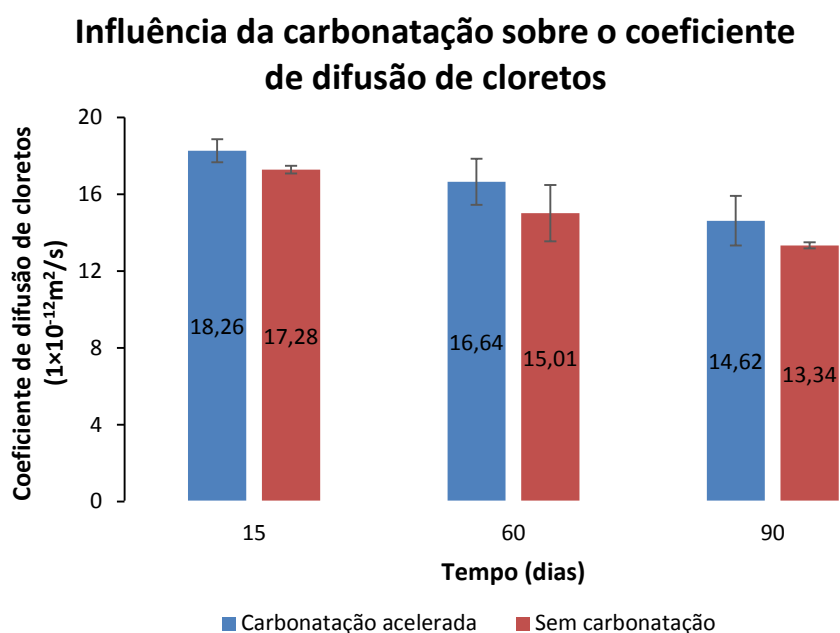


Figura 5-2 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo de carbonatação acelerada e sem carbonatação para os provetes de 0% CV

5.2.2. Com CV

Na Figura 5-3 está representada a variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo de carbonatação acelerada e sem carbonatação para os provetes de 20% CV, onde é possível observar que, para os 15 dias, a variação do coeficiente de difusão de cloretos não é significativa, com valor médio de $8,41 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ com carbonatação acelerada e $8,57 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$

sem carbonatação, pelo qual não se pode dizer que houve um efeito da carbonatação no mesmo visto que os dois valores são quase iguais.

Para os 60 e 90 dias, é possível observar que já existe uma diferença bastante significativa do coeficiente de difusão de cloretos, com valor médio de $7,12 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ com carbonatação acelerada e $4,08 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ sem carbonatação para os 60 dias, e um valor médio de $7,34 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ com carbonatação acelerada e $3,62 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ sem carbonatação para os 90 dias. Pode-se, assim, dizer, tendo em conta esses valores, que a carbonatação acelerada teve de facto um impacto no coeficiente de difusão de cloretos provocando o aumento do mesmo, sendo também possível verificar-se uma pequena diminuição do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo das amostras carbonatadas, bem como das amostras não carbonatadas, sendo destas últimas mais visível essa diminuição.

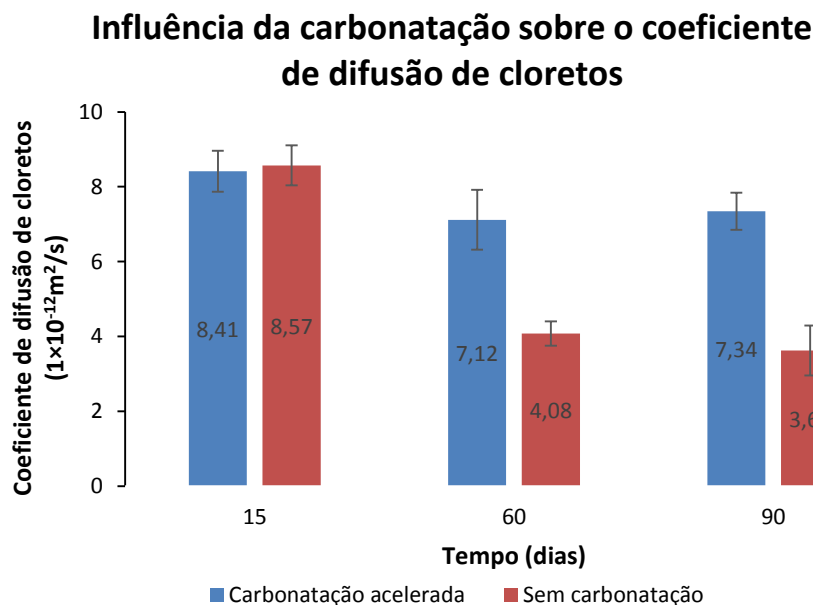


Figura 5-3 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo de carbonatação acelerada e sem carbonatação para os provetes de 20% CV

Na Figura 5-4 está representada a variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo de carbonatação acelerada e sem carbonatação para os provetes de 40% CV, onde é possível observar que para os 15, 60 e 90 dias, tempos em estudo, a diferença do valor do coeficiente de difusão de cloretos entre as amostras carbonatadas e as não carbonatadas é significativa, sendo que para os 15 dias o coeficiente de difusão de cloretos tinha um valor médio de $8,00 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ com carbonatação acelerada e $3,87 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ sem carbonatação, para os 60 dias de um valor médio de $8,66 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ com carbonatação acelerada e $1,93 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ sem carbonatação, e

para os 90 dias um valor médio de $8,60 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ com carbonatação acelerada e $2,18 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ sem carbonatação. Pode-se, assim, dizer, tendo em conta estes valores, que a carbonatação acelerada teve de facto um impacto no coeficiente de difusão de cloretos, provocando o aumento do mesmo. É também possível verificar, pelos valores representados, que, para a carbonatação acelerada, existe um pequeno aumento do valor do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo e uma redução do mesmo sem carbonatação.

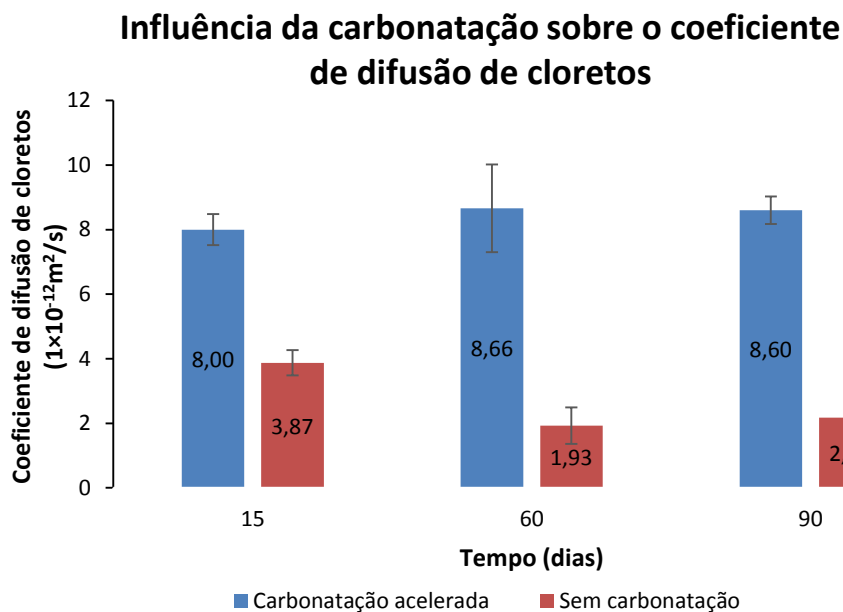


Figura 5-4 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo de carbonatação acelerada e sem carbonatação para os provetes de 40% CV

Na Figura 5-5 está representada a variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo de carbonatação acelerada e sem carbonatação para os provetes de 60% CV, onde é possível observar que para os 15, 60 e 90 dias a diferença do valor do coeficiente de difusão de cloretos é significativa, com valor médio de $8,80 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ com carbonatação acelerada e $4,76 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ sem carbonatação para os 15 dias, um valor médio de $9,87 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ com carbonatação acelerada e $1,97 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ sem carbonatação para os 60 dias e um valor médio de $12,64 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ com carbonatação acelerada e $3,41 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ sem carbonatação para os 90 dias, podendo dizer-se, tendo em conta estes valores, que a carbonatação acelerada teve, de facto, um impacto no coeficiente de difusão de cloretos, provocando o aumento do mesmo.

É também possível verificar, pelos valores representados, que para a carbonatação acelerada, existe um aumento do valor do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo, sendo que sem

carbonatação, dos 15 para os 60 dias, existe uma redução do coeficiente de difusão de cloretos e, dos 60 para os 90 dias, existe um aumento do mesmo.

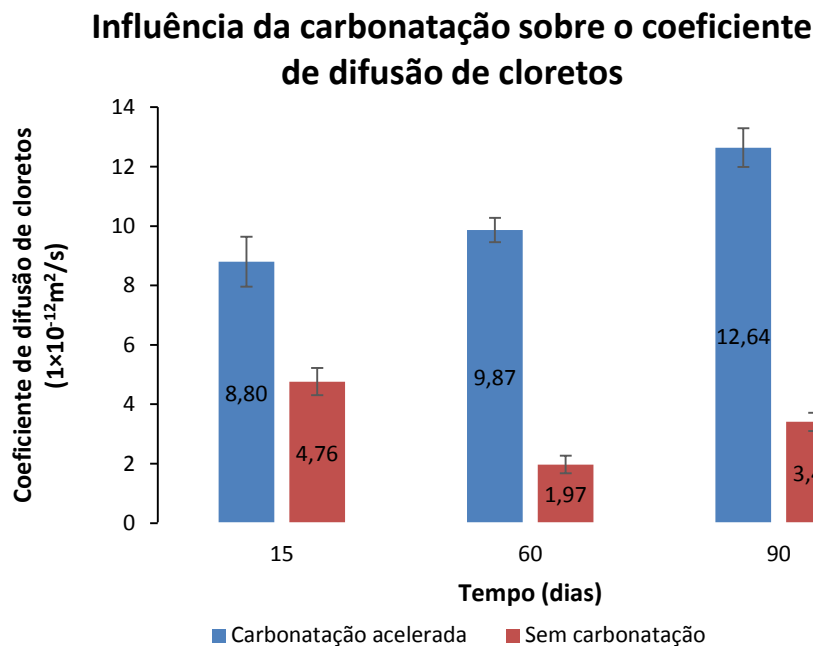


Figura 5-5 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo de carbonatação acelerada e sem carbonatação para os provetes de 60% CV

Na Figura 5-6 está representada a variação do coeficiente de difusão de cloretos de cada composição com CV, 20%, 40% e 60% de CV, dos provetes sujeitos a 15 dias de carbonatação acelerada de modo a verificar o efeito das CV no coeficiente de difusão de cloretos.

Através dos valores médios, é possível verificar que o coeficiente de difusão de cloretos médio dos provetes de 20% CV é superior ao dos provetes de 40% CV e inferior ao dos provetes de 60%, sendo esses valores $8,41$, $8,00$ e $8,80 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ respetivamente, onde se verifica também que o valor do coeficiente de difusão de cloretos dos provetes de 40% CV inferior ao dos provetes de 60% CV.

Devido ao tempo de carbonatação ser bastante pequeno não é possível verificar uma diferença significativa do coeficiente de difusão de cloretos, através dos valores médios e do desvio padrão, entre as diferentes composições em estudo.

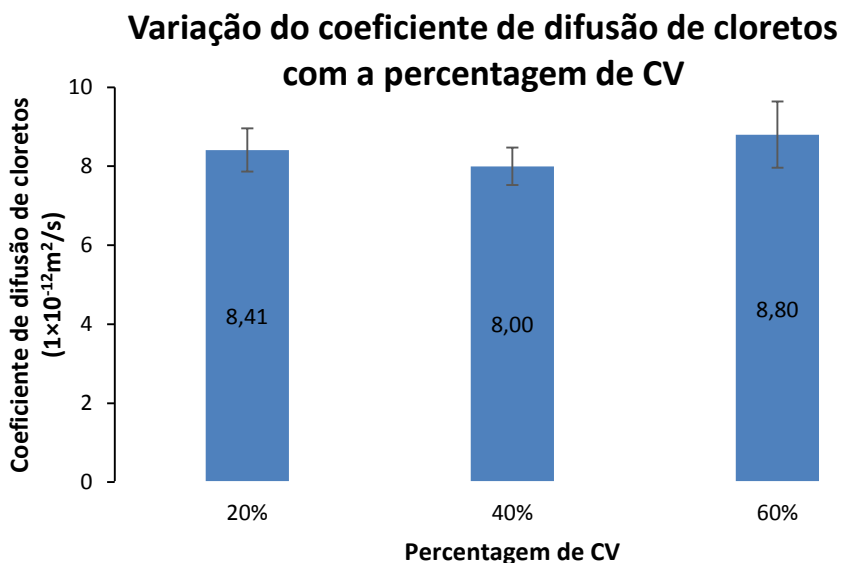


Figura 5-6 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos de cada composição com CV dos provetes sujeitos a 15 dias de carbonatação acelerada

Na Figura 5-7 está representada a variação do coeficiente de difusão de cloretos de cada composição com CV dos provetes sujeitos a 60 dias de carbonatação acelerada de modo a verificar o efeito das CV no coeficiente de difusão de cloretos. Através dos resultados apresentados, o coeficiente de difusão de cloretos das composições de 20%, 40% e 60% de CV é respetivamente $7,12$, $8,66$ e $9,87 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Podemos concluir, assim, que o aumento da percentagem de CV na mistura provoca um aumento do coeficiente de difusão de cloretos.

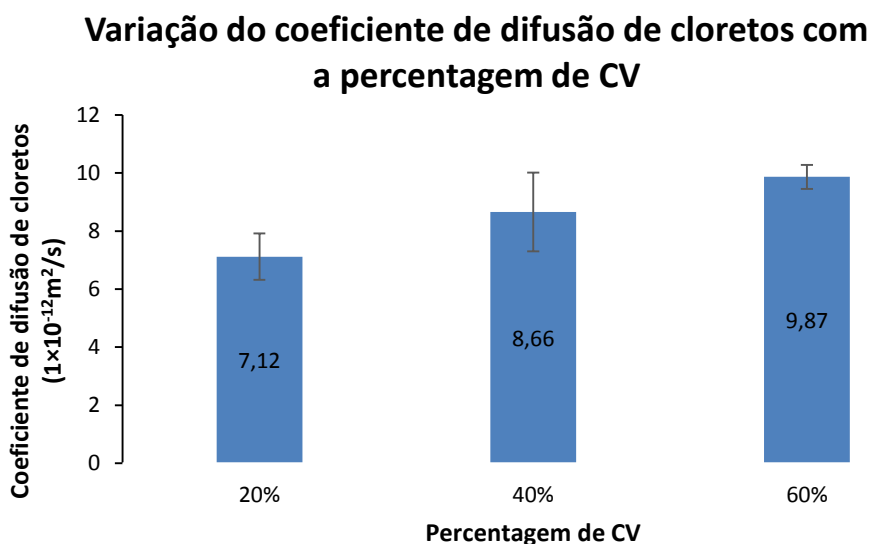


Figura 5-7 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos de cada composição com CV dos provetes sujeitos a 60 dias de carbonatação acelerada

Na Figura 5-8 está representada a variação do coeficiente de difusão de cloretos de cada composição com CV dos provetes sujeitos a 90 dias de carbonatação acelerada. Através dos resultados apresentados, o coeficiente de difusão de cloretos das composições de 20%, 40% e 60% de CV é respetivamente 7,34, 8,60 e $12,64 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$, pelo que se pode concluir que o aumento da percentagem de CV na mistura provoca um aumento do coeficiente de difusão de cloretos, sendo este aumento já significativo aos 90 dias de ensaio.

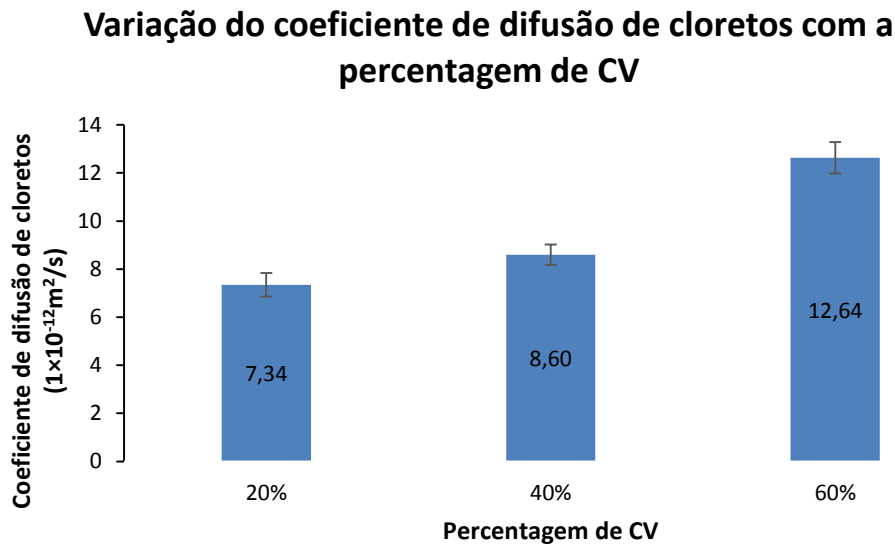


Figura 5-8 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos de cada composição com CV dos provetes sujeitos a 90 dias de carbonatação acelerada

5.3. Avaliação dos parâmetros de durabilidade

De seguida são analisados os resultados obtidos para a absorção de água por capilaridade e por imersão das diferentes composições em estudo de modo a avaliar o efeito da carbonatação acelerada na estrutura porosa dos provetes.

5.3.1. Absorção de água por capilaridade

Na Tabela 5-1 estão representados os valores da absorção capilar obtidos para as situações de estudo dos provetes com 0% de CV, em que se pode observar que os provetes que estiveram envolvidos em película plástica em ambiente laboratorial durante 90 dias, sem carbonatação, comparados com a situação de referência, efetuada após a saída dos provetes da cura, obtiveram um valor de absorção capilar superior de $0,1901 \text{ kg/m}^2/\text{min}^{1/2}$ e $0,0467 \text{ kg/m}^2/\text{min}^{1/2}$ respetivamente.

Através da comparação da absorção capilar obtida da situação com carbonatação acelerada, $0,0954 \text{ kg/m}^2/\text{min}^{1/2}$, e a situação sem carbonatação, $0,1901 \text{ kg/m}^2/\text{min}^{1/2}$, é possível verificar o efeito da carbonatação na absorção capilar, sendo possível verificar que existiu uma diminuição da absorção capilar da situação sem carbonatação para a situação com carbonatação acelerada.

Tabela 5-1 – Absorção Capilar das amostras de 0% de CV para as situações de estudo

	Absorção capilar ($\text{kg/m}^2/\text{min}^{1/2}$)
0% referência	0,0467
0% Sem carbonatação	0,1901
0% Carbonatação Acelerada	0,0954

Na Tabela 5-2 estão representados os valores da absorção capilar obtidos para as situações de estudo dos provetes com 20% de CV, tendo sido obtido um valor da absorção capilar de $0,1244 \text{ kg/m}^2/\text{min}^{1/2}$ e de $0,1236 \text{ kg/m}^2/\text{min}^{1/2}$ para as situações sem carbonatação e com carbonatação acelerada respetivamente.

A partir dos valores obtidos, é possível verificar que ambos obtiveram uma absorção capilar muito parecida e, comparando estes valores com a situação de 0% de CV, é possível verificar que para a situação sem carbonatação, houve uma diminuição da absorção capilar, $0,1901 \text{ kg/m}^2/\text{min}^{1/2}$ para 0% CV e $0,1244 \text{ kg/m}^2/\text{min}^{1/2}$ para 20% CV e, para a situação com carbonatação, existiu um aumento da absorção capilar, $0,0954 \text{ kg/m}^2/\text{min}^{1/2}$ para 0% CV e $0,1236 \text{ kg/m}^2/\text{min}^{1/2}$ para 20% CV. Tendo esta comparação em conta, é possível verificar que a adição de 20% de CV na constituição dos provetes provoca uma alteração da absorção capilar nos mesmos.

Tabela 5-2 - Absorção Capilar das amostras de 20% de CV para as situações de estudo

	Absorção capilar ($\text{kg/m}^2/\text{min}^{1/2}$)
20% referência	0,0406
20% Sem carbonatação	0,1244
20% Carbonatação Acelerada	0,1236

Na Tabela 5-3 e na Tabela 5-4 estão representados os valores da absorção capilar obtidos para as situações de estudo dos provetes com 40% e 60% de CV respetivamente, tendo sido obtido

um valor da absorção capilar de $0,1365 \text{ kg/m}^2/\text{min}^{1/2}$ dos provetes de 40% CV e de $0,1643 \text{ kg/m}^2/\text{min}^{1/2}$ dos provetes de 60% CV para a situação sem carbonatação, e um valor da absorção capilar de $0,242 \text{ kg/m}^2/\text{min}^{1/2}$ dos provetes de 40% CV e de $0,2595 \text{ kg/m}^2/\text{min}^{1/2}$ dos provetes de 60% CV para a situação com carbonatação acelerada.

Através destes valores, podemos verificar que tanto para os provetes com 40% de CV como para os provetes com 60% de CV o valor da absorção capilar é superior para a situação com carbonatação acelerada, pelo que se pode dizer que com estes valores de percentagem de CV nos provetes, a carbonatação afeta a absorção capilar dos mesmos.

Tabela 5-3 - Absorção Capilar das amostras de 40% de CV para as situações de estudo

	Absorção capilar ($\text{kg/m}^2/\text{min}^{1/2}$)
40% referência	0,0693
40% Sem carbonatação	0,1365
40% Carbonatação Acelerada	0,242

Tabela 5-4 - Absorção Capilar das amostras de 60% de CV para as situações de estudo

	Absorção capilar ($\text{kg/m}^2/\text{min}^{1/2}$)
60% referência	0,0794
60% Sem carbonatação	0,1643
60% Carbonatação Acelerada	0,2595

5.3.2. Absorção de água por imersão

Através da Tabela 5-5 onde estão representados os valores das absorções capilares para as situações de estudo dos provetes de 0% CV, é possível observar que a absorção capilar para os provetes de referência, 8,87%, é inferior à dos provetes que passaram 90 dias em ambiente de laboratório, embrulhados em película plástica, que não passaram pela carbonatação, 12,86%.

Comparando os provetes que não passaram pela carbonatação, 12,86%, e os provetes que passaram pela carbonatação acelerada, 11,67%, ambos aos 90 dias, pode-se verificar que a carbonatação acelerada provocou uma ligeira redução da absorção de água dos provetes.

Tabela 5-5 - Valores das absorções de água para as situações de estudo dos provetes de 0%

CV	
	A (%)
0% referência	8,87
0% Sem carbonatação	12,86
0% Carbonatação Acelerada	11,67

Através da Tabela 5-6 onde estão representados os valores das absorções de água para as situações de estudo dos provetes de 20% CV, é possível observar que a absorção de água para os provetes de referência, 7,53%, é inferior à dos provetes que passaram 90 dias em ambiente de laboratório, sem carbonatação, 10,56.

Comparando os provetes que não passaram pela carbonatação, 10,56%, e os provetes que passaram pela carbonatação acelerada, 10,85%, é possível dizer que não houve uma alteração da absorção.

Tabela 5-6 - Valores das absorções capilares para as situações de estudo dos provetes de

20% CV	
	A (%)
20% referência	7,53
20% Sem carbonatação	10,56
20% Carbonatação Acelerada	10,85

Através da Tabela 5-7 e da Tabela 5-8 onde estão representados os valores das absorções de água para as situações de estudo dos provetes de 40% e 60% de CV respetivamente, é possível observar que a absorção de água para os provetes de referência, 8,03% para os provetes de 40% de CV e 8,59% e para os provetes de 60% de CV, é inferior à dos provetes que passaram 90 dias em ambiente de laboratório embrulhados em película plástica, sem carbonatação, 11,19% para os provetes de 40% de CV e 11,68% para os provetes de 60% de CV.

Comparando os provetes que não passaram pela carbonatação, 11,19% para os provetes de 40% de CV e 11,68% para os provetes de 60% de CV, e os provetes que passaram pela carbonatação acelerada, 13,68% para os provetes de 40% de CV e 14,52% para os provetes de 60% de CV, é possível dizer que existiu um aumento da absorção de água dos provetes que não passaram pela carbonatação para a carbonatação acelerada, verificando assim que o CO₂ provocou uma alteração na estrutura porosa dos provetes sujeitos a carbonatação acelerada.

Tabela 5-7 - Valores das absorções capilares para as situações de estudo dos provetes de
40% CV

	A (%)
40% referência	8,03
40% Sem carbonatação	11,19
40% Carbonatação Acelerada	13,68

Tabela 5-8 - Valores das absorções capilares para as situações de estudo dos provetes de
60% CV

	A (%)
60% referência	8,59
60% Sem carbonatação	11,68
60% Carbonatação Acelerada	14,52

6. CONCLUSÕES

Tendo em conta a existência de poucos registos de trabalhos de investigação sobre a ação combinada da carbonatação e da penetração de cloretos, e visto que para a durabilidade do betão o coeficiente de difusão de cloretos é de grande importância, foi estudado o mesmo em betões carbonatados e em betões contendo ou não CV.

Relativamente à influência das CV sobre o coeficiente de difusão de cloretos, em betões não carbonatados, foi possível constatar através dos resultados obtidos que as CV reduzem significativamente o coeficiente de difusão de cloretos, sendo que dentro das composições estudadas, a composição mais benéfica foi a de 40% de CV em todos os tempos de estudo.

Em relação à carbonatação, as amostras de diferentes composições em estudo, 0% CV, 20% CV, 40% CV e 60% CV, foi possível verificar que em todos os tempos de estudo, a profundidade de carbonatação aumentou com o aumento da percentagem de CV existente na composição das amostras.

Tendo em conta a influência da carbonatação sobre o coeficiente de difusão de cloretos, foi estudado o efeito da carbonatação, em betões contendo ou não CV, no coeficiente de difusão de cloretos. Nos betões que não continham CV foi possível verificar, em todos os períodos de estudo, que o coeficiente de difusão de cloretos nas amostras carbonatadas era superior ao das amostras não carbonatadas. Nos betões que continham CV, para as amostras de 20% CV, foi possível verificar que, para o primeiro tempo de estudo de 15 dias, não existiu uma diferença significativa no coeficiente de difusão de cloretos entre as amostras carbonatadas e as não carbonatadas. Para os 60 e 90 dias, já existiu uma diferença bastante significativa, sendo o coeficiente de difusão de cloretos das amostras carbonatadas aproximadamente do dobro que o das amostras não carbonatadas, pelo qual se pode dizer que a carbonatação provocou um aumento no coeficiente de difusão de cloretos. Nas amostras de 40% CV, é possível verificar, para todos os tempos de estudo, que o coeficiente de difusão de cloretos foi bastante superior para as amostras carbonatadas do que para as amostras não carbonatadas, pelo qual podemos dizer que a carbonatação influenciou o coeficiente de difusão de cloretos. É também possível verificar, pelos valores representados, que, para a carbonatação acelerada, existe um pequeno aumento do valor do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo e uma redução do mesmo para a carbonatação natural. Nas amostras de 60% CV, foi possível verificar, para todos os tempos de estudo, que o coeficiente de difusão de cloretos é bastante superior para as amostras

carbonatadas que para as amostras não carbonatadas, pelo qual podemos dizer que a carbonatação influenciou o coeficiente de difusão de cloretos. É também possível verificar, pelos valores representados, que, para a carbonatação acelerada, existe um aumento do valor do coeficiente de difusão de cloretos com o tempo, sendo que, para a carbonatação natural, dos 15 para os 60 dias, existe uma redução do coeficiente de difusão de cloretos e, dos 60 para os 90 dias, existe um aumento do mesmo. Comparando todas as composições em estudo, 0% CV, 20% CV, 40% CV e 60% CV, é possível verificar que o coeficiente de difusão de cloretos é sempre superior para a composição de 0% de CV do que para todas as outras composições, em todos os períodos em estudo.

O aumento do coeficiente de difusão de cloretos com a carbonatação parece ser devido à perda de capacidade de fixação (*binding*) dos cloretos e o aumento de porosidade nas argamassas com CV.

Avaliando o indicador de durabilidade, absorção de água por capilaridade, é possível dizer que a absorção capilar aumentou com a percentagem de CV na amostra. Tendo em conta agora o efeito da carbonatação neste parâmetro, foi possível verificar para as amostras de 0% que a carbonatação não afetou o parâmetro de absorção capilar visto esta ser maior para as amostras não carbonatadas, o que seria de esperar visto que a carbonatação colmata parcialmente os poros. Para as amostras de 20% de CV, a absorção capilar das amostras carbonatadas e das não carbonatadas foi a mesma. Para as amostras de 40% CV e 60% de CV, o valor da absorção capilar foi superior para as amostras carbonatadas, pelo qual se pode verificar que a carbonatação afetou este parâmetro.

Avaliando o indicador de durabilidade, absorção de água por imersão e tendo em conta o efeito da carbonatação neste parâmetro, foi possível verificar para as amostras de 0% CV que a carbonatação não afetou o parâmetro de absorção de água visto esta ser maior para as amostras não carbonatadas. Para as amostras de 20% de CV, a absorção de água das amostras carbonatadas e das não carbonatadas foi a mesma. Para as amostras de 40% CV e 60% de CV, o valor da absorção de água foi superior para as amostras carbonatadas, pelo qual se pode verificar que a carbonatação afetou este parâmetro.

É importante referir que todos os resultados obtidos estão diretamente relacionados com as condições em estudo, materiais utilizados e ensaios realizados, e não devem ser tomados como

absolutos. Assim, qualquer tipo de afirmação feita neste estudo deve ser considerada com bastante precaução e não como uma certeza.

Estudos futuros:

- O efeito da penetração de cloretos na carbonatação;
- Estudar de que modo a carbonatação e a penetração de cloretos influenciaram a rede porosa das amostras em estudo, através do ensaio de absorção de água por capilaridade e imersão;
- Avaliar o efeito das ações serem cíclicas;
- Avaliar a composição química das argamassas com CV.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. N. F. Lopes, “Durabilidade de betões com metacaulino - propagação de cloretos,” Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2013.
- [2] R. de L. M. de C. Malheiro, “Durabilidade do betão à ação combinada da carbonatação e dos iões cloreto considerando a presença de cinzas volantes,” Universidade do Minho, Guimarães, 2013.
- [3] M. A. O. Vagheti, “Efeitos da cinza volante com cinza de casca de arroz ou sílica ativa sobre a carbonatação do concreto de cimento portland,” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.
- [4] S. Jung, Y. Choi, and B. Lee, “Influence of carbonation on the chloride diffusion in concrete.,” *SB07 Seoul Proc. Int. Conf. Sustain. Build. Asia, Seoul, Korea*, pp. 137–707, 2007.
- [5] Y. Chengfang, N. Ditao, and L. Daming, “Effect of Carbonation on Chloride Diffusion in Fly Ash Concrete,” *Disater Adv.*, vol. 5, no. 4, 2012.
- [6] I. F. G. Monteiro, “Modelação da evolução da carbonatação em elementos de betão armado,” Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.
- [7] C. Alonso, M. Acha, C. Andrade, and J. Sagrera, “Incidencia de la adición de cenizas volantes en la durabilidad de las estructuras de hormigón armado,” *Hormigón y Acero, Assoc. Cient. del Hormigón Estructural*, no. 194, pp. 43–52, 1994.
- [8] Instituto Português da Qualidade, *NP EN 206-1 Betão - Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*. Caparica, 2007.
- [9] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, *LNEC E 464-2005 Betões - Metodologia prescritiva para a vida útil de projecto de 50 anos face face às acções ambientais*. Lisboa, 2005.
- [10] Instituto Português da Qualidade, *NP EN 1992-1-1 2008 Eurocódigo 2: Projecto de estruturas de betão Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios*. Caparica, 2008.

- [11] A. Camões, P. Rocha, R. Delgado, S. Jalali, and B. Aguiar, “Influência das cinzas volantes no desempenho de betões,” *BE2000*, p. 10, 2000.
- [12] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, *LNEC E 465-2007 Betões - Metodologia para estimar as propriedades de desempenho de betão que permitem satisfazer a vida útil de projecto de estruturas de betão armado ou pré-esforçado sob exposições ambientais XC e XS*. Lisboa, 2007.
- [13] Durar, “Durabilidade de la armadura; Manual de Inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado,” in *CYTED - Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo*, 1998, p. 208.
- [14] M. Grochoski and P. Helene, “Sistemas de reparo para estruturas de concreto com corrosão de armaduras,” *Bol. Técnico da Esc. Politécnica da USP*, 2008.
- [15] A. F. Bakker, “Structural Investigations,” *Durab. Concr. Struct.*, 1991.
- [16] CEB, “CEB Design Guide - Bulletin d’Information nr.182.” .
- [17] M. J. Á. R. de S. Coutinho, “Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem,” Tese de Doutoramento, Universidade do Porto, Porto, 1998.
- [18] J. Gouveia, “Degradação do Betão por Fenómenos de Carbonatação: Consequências nas Armaduras das Edificações Após 50 anos na cidade de Lisboa,” Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2010.
- [19] K. Tuutti, *Corrosion of steel in concrete - Swedish Cement and Concrete Research*. Stockholm, 1982.
- [20] K. Tuutti, “Effect of cement type and different additions on service life,” in *Concrete 2000 - Economic and Durable Construction Through Excellence*, Scotland, UK, 1993.
- [21] G. N. S. Camacho, “A Ação Combinada da Carbonatação e dos Cloretos : Avaliação do Coeficiente de Difusão de Cloretos em Betões Carbonatados,” Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, 2015.

- [22] J. Andrade, “Contribuição à Previsão da Vida Útil das Estruturas de Concreto Armado pela Corrosão de Armaduras: Iniciação Por Cloretos,” Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2001.
- [23] C. Andrade, “Ultimos Avances en el Calculo de la Vida Uril del Hormigon Estructural,” *Jornadas Sudam. Ing. Estructural*, p. 31, 2000.
- [24] R. Malheiro, “Service Life Design - Selicon Modelling of Concrete Performance.” Guimarães, 2010.
- [25] J. M. E. S. Silva, “Durabilidade do Betão: Caracterização de amostras de betão recolhidas ao longo de dois túneis da Região Autónoma da Madeira,” Dissertação de Mestrado, Universidade da Madeira, Madeira, 2014.
- [26] E. M. S. Freitas, “Corrosão do Betão Armado Induzida por Carbonatação e pela Presença de Cloretos,” Dissertação de Mestrado, Universidade da Madeira, Madeira, 2013.
- [27] P. R. L. Helene, “Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado,” Universidade de São Paulo, 1993.
- [28] M. Simas, “Sistemas de Proteção do Betão Face à Carbonatação,” Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa, 2007.
- [29] P. Castro, O. T. Rincon, and E. J. Pazini, “Interpretation of Chloride Profiles from Concrete Exposed to Tropical Marine Environments,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, pp. 539–537, 2001.
- [30] A. Costa, “Anomalias e Mecanismos de Deterioração,” *Módulo 2. Apontamentos da Cadeira Reabil. e Reforço Estrutural, Inst. Super. Técnico*, 1999.
- [31] A. Costa and J. Appleton, “Concrete carbonation and chloride penetration in a marine environment,” *Concr. Sci. Eng.*, vol. 3, pp. 242–249, 2001.
- [32] O. Cascudo, *Controle da Corrosão de Armaduras em Concreto: Inspeção e Técnicas Eletroquímicas*, 1ª Edição. São Paulo: PINI, 1997.

- [33] V. G. A. Pereira, “Avaliação do Coeficiente de Difusão de Cloretos em Concretos: Influência do Tipo de Cimento, da Relação A/C, da Temperatura e do tempo de cura,” Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.
- [34] G. Meira, “Agressividade por Cloretos em Zona de Atmosfera Marinha Frente ao Problema da Corrosão em Estruturas de Concreto Armado,” Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2004.
- [35] L. R. Fortes, “Corrosão na armadura do concreto armado e sua avaliação pela técnica do potencial de eletrodo,” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Ceará, 1995.
- [36] C. Andrade, *Manual para Diagnóstico de Obris Deterioradas por Corrosão de Armaduras*. São Paulo: PINI, 1992.
- [37] T. U. Mohammed and H. Hamada, “Relationship Between Free Chloride and Total Chloride Contents in Concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, pp. 1487–1490, 2003.
- [38] E. P. Nielsen and M. R. Geiker, “Chloride diffusion in partially saturated cementitious material,” vol. 33, pp. 133–138, 2003.
- [39] R. M. Ferreira, “Avaliação de ensaios de durabilidade do betão,” Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, 2000.
- [40] J. Crank, N. R. McFarlane, J. C. Newby, G. D. Paterson, and B. Pedley, J, *Diffusion Process in Environmental Systems*. Londres: Macmillan Press LTD, 1981.
- [41] G. Polito, “Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Causas, Mecanismos, Prevenção e Recuperação,” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2006.
- [42] L. Tang, “Concentration Dependence of Diffusion and Migration of Chloride Ions Part 1. Theoretical Considerations,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, pp. 1463–1468, 1999.
- [43] L. Tong and O. E. Gjorv, “Chloride Diffusivity Based on Migration Testing,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, pp. 973–982, 2001.
- [44] C. L. Page, N. R. Short, and A. Tarras, “Diffusion of Chloride Ions in Hardened Cement

- Pastes,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 11, pp. 395–406, 1981.
- [45] B. H. Oh and S. Y. Jang, “Effects of Material and Environmental Parameters on Chloride Penetration Profiles in Concrete Structures,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, pp. 47–53, 2007.
- [46] Rasheeduzzafar, “Effect of Tricalcium Aluminate Content of Cement on Corrosion of Reinforced Steel in Concrete,” *Cem. Concr. Res.*, pp. 723–738, 1990.
- [47] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*, 1ª. São Paulo: PINI, 1994.
- [48] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*, 3ª. São Paulo: IBRACON, 2008.
- [49] A. Neville, *Propriedades do Concreto*. São Paulo: Pini, 1997.
- [50] R. F. M. Bakker, “Initiation Period,” in *In: Shciessl, P (Ed.) Corrosion of steel in concrete*, New York: RILEM/ Chapman and Hall, 1988, pp. 22–55.
- [51] O. M. Jensen, P. F. Hansen, A. M. Coats, and F. P. Glasser, “Chloride Ingress in Cement Paste and Mortar,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, pp. 1497–1504, 1999.
- [52] H. Bellei and M. G. Lima, “Estudo do desempenho de perfis estruturais metálicos soldados por alta frequência usados na construção de edifícios,” *Congr. Int. da Construção Metálica*, 2005.
- [53] F. Nogue, S. Lorente, and J. P. Ollivier, “Basis for the Prediction of Chloride Ingress into Cement-Based Materials,” *Rev. Ciência e Tecnol. Mater. Construção Civ.*, vol. 1, no. 1, pp. 10–21, 2004.
- [54] R. Cerný, Z. Pavlík, and P. Rovnaníková, “Experimental Analysis of Coupled Water and Chloride Transport in Cement Mortar,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, pp. 705–715, 2004.
- [55] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, *LNEC E 463-2004 Betões - Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário*. Lisboa, 2004.

- [56] J. M. B. Soares, “Barramento delgado anti carbonatação,” Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães, 2015.
- [57] M. Vagheti, “Estudo da corrosão do aço induzida por carbonatação em concretos com adições minerais,” Tese de Doutoramento, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2005.
- [58] L. J. Parrot, “A Review of Carbonation in Reinforced Concrete,” *Cem. Concr. Assoc. Build. Researsh Establ.*, 1987.
- [59] A. Camões, “Betões de Elevado Desempenho com Incorporação de Cinzas Volantes,” Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, Guimarães, 2002.
- [60] R. M. Netto, “Materiais Pozolânicos,” Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.
- [61] R. Reis, “Resistência à carbonatação de betões de elevado volume de cinzas volantes.” pp. 49–59, 2015.
- [62] B. B. Das and S. P. Pandey, “Influence of fineness of fly ash on the carbonation and electrical conductivity of concrete,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 23(9), pp. 1365–1368, 2011.
- [63] M. Khan and C. Lynsdale, “Strength, Permeability, and carbonation of high-performance concrete,” *Cem. Concr. Res.*, pp. 123–131, 2002.
- [64] L. Jiang, B. Lin, and Y. Cai, “A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 30(5), pp. 699–702, 2000.
- [65] J. Backus, D. McPolin, and N. Holmes, “Monitoring the interation of combined mechanisms in the deterioration of concrete,” *32 Cem. Concr. Sci. Conf. Pap. n. PRE38*, pp. 17–18.
- [66] A. A. Ramezaniapour, S. A. Ghahari, and M. Esmaili, “Effect of Combined Carbonation and Chloride ion ingress by an Accelerated Test Method on Microscopic and Mechanical Properties of Concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 58, pp. 138–146, 2014.
- [67] K. Kobayashi, R. Shiraki, and K. Kawai, “Carbonation of Concrete,” *Proc. JSCE*, no.

- 433, pp. 1–14, 1991.
- [68] M. Leivo, E. Sistonen, F. Al-Neshawy, J. Piironen, H. Kuosa, E. Holt, P. Koskinen, and C. Nordqvist, “Effect of interacted deterioration parameters on service life of concrete structures in cold environments,” 2011.
- [69] M. F. Montemor, M. P. Cunha, M. G. Ferreira, and A. M. Simões, “Corrosion Behaviour of Rebars in Fly Ash Mortar Exposed to Carbon Dioxide and Chlorides,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 24, pp. 45–53, 2002.
- [70] Instituto Português da Qualidade, “NP EN 197-1 Cimento Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes.” Caparica, 2012.
- [71] SECIL, “Cimento Portland - EN 197-1 CEM I 42,5 R.” Maceira-Liz.
- [72] Instituto Português da Qualidade, *NP EN 933-1 Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica Método de peneiração*. Caparica, 2000, p. 15.
- [73] Instituto Português da Qualidade, “NP EN 196-1. Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas.” *Norma Portuguesa*. p. 37, Caparica, 2006.
- [74] Instituto Português da Qualidade, *NP EN 12350-1 Ensaios do betão fresco Parte 1: Amostragem*. Caparica, 2009.
- [75] Instituto Português da Qualidade, *NP EN 12390-3 Ensaios do betão endurecido Parte 3: Resistência à compressão de provetes*. Caparica, 2009.
- [76] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, *LNEC E 391-1993 Betões - Determinação da resistência à carbonatação*. Lisboa, 1993.
- [77] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, *LNEC E 393-1993 Betões - Determinação da absorção de água por capilaridade*. Lisboa, 1993.
- [78] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, *LNEC E 394-1993 Betões - Determinação da absorção de água por imersão*. Lisboa, 1993.