



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

André Henriques Nunes Coelho

Análise Comparativa dos Procedimentos
Utilizados para o Ensaio Acelerado de Imersão
e Secagem Face à Ação dos Iões Cloreto



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

André Henriques Nunes Coelho

Análise Comparativa dos Procedimentos
Utilizados para o Ensaio Acelerado de Imersão
e Secagem Face à Ação dos Iões Cloreto

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

Por mais palavras que possa tecer, seguramente não são suficientes para agradecer a todas as pessoas que me ajudaram ao longo deste percurso. Deste modo, deixo algumas breves palavras, com um profundo sentimento de agradecimento.

Não podendo começar de outra maneira, agradeço aos meus pais. À minha mãe, que consegui cumprir o seu desejo e sonho de ter o filho formado e ao meu pai por me ter apoiado sempre em todas as decisões e me proporcionar todas as condições para a realização deste curso.

Agradeço à minha namorada, por todo o amor, carinho, dedicação e paciência que teve ao longo deste período, apoiando em todos os momentos.

A todos os meus amigos que me acompanharam ao longo deste percurso.

Ao meu colega e amigo João, por todo o companheirismo, amizade, ajuda e todas as memórias desta caminhada.

Ao professor Aires Camões, o meu muito obrigado por todo o incentivo e apoio incondicional ao longo deste trabalho.

À Raphaele Malheiro, que por mais palavras que diga, com certeza vão ser poucas para expressar o agradecimento por toda a dedicação e apoio que me deste ao longo desta dissertação.

Ao Carlos Jesus, técnico de laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho, agradecer todo o apoio, dedicação e amizade.

ANÁLISE COMPARATIVA DOS PROCEDIMENTOS UTILIZADOS PARA O ENSAIO ACELERADO DE IMERSÃO E SECAGEM FACE À AÇÃO DOS IÕES CLORETO

RESUMO

Para garantir a sustentabilidade das estruturas de betão armado é imprescindível garantir a sua durabilidade. Estando estes dois conceitos interligados, conhecer o comportamento destas estruturas face à presença e ação dos agentes agressores adquire uma elevada importância. A corrosão do aço no betão é o problema que mais afeta a durabilidade destas estruturas e, por consequente, a sua sustentabilidade. Uma vez que a penetração dos agentes agressores acontece de forma relativamente lenta, os ensaios acelerados são uma alternativa recorrente na literatura. Os ciclos de imersão em cloretos e secagem ao ar, apesar de ainda não serem normalizados, são cada vez mais utilizados quando se deseja acelerar a penetração de cloretos.

Assim, com o objetivo de conhecer melhor o funcionamento deste ensaio acelerado, esta dissertação analisa a influência de diversos fatores: a influência do teor de NaCl na penetração de cloretos em matrizes cimentícias submetidas aos ciclos de imersão e secagem; a influência da presença de hidróxido de cálcio na solução de molhagem; a influência da presença de dióxido de carbono (CO₂) na fase de secagem; a influência dos dias de molhagem e secagem para ciclos curtos e ciclos longos; por último a influência do período total do ensaio de imersão e secagem. Para isso, foram moldados provetes cúbicos com 5cm de aresta, em argamassa, utilizando cimento CEM I 42,5 e relação água/ligante 0,5. Após 30 dias de cura os provetes foram submetidos a seis diferentes ciclos de imersão e secagem, bem como ao ensaio de imersão durante 60 dias. Terminado o período de ensaio, os provetes foram rompidos perpendicularmente à face exposta e a profundidade de penetração de cloretos foi avaliada através da aspersão de uma solução de nitrato de prata na secção de rotura e, nas amostras que na fase de secagem tiveram a presença de CO₂, metade da amostra foi aspergida com nitrato de prata e a outra metade com fenolftaleína.

Os resultados apontam para um papel relevante da concentração de NaCl neste tipo de ensaio, sob as condições estudadas. Confirmando, assim, a importância de continuar a estudar as variáveis envolvidas para que se possa caminhar, cada vez mais, no sentido da normalização.

PALAVRAS-CHAVE: Argamassa; iões cloreto; ensaio acelerado; imersão; secagem.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PROCEDURES USED FOR IMPROVED IMMERSION AND DRYING TEST ACTION OF CHLORIDE IONS

ABSTRACT

To ensure the sustainability of reinforced concrete structures, it is essential to ensure durability. Being these two concepts interconnected, knowing the behaviour of these structures in the face of the presence and action of aggressive agents acquires a high importance. The corrosion of steel in concrete is the problem that most affects the durability of these structures, and consequently their sustainability. Since this penetration occurs relatively slowly, accelerated tests are a recurrent alternative in the literature. The cycles of immersion in chlorides and air drying, although not yet normalized, are increasingly used when accelerating the penetration of chlorides.

Thus, in order to better understand the performance of this accelerated test, this dissertation analyzes the influence of several factors: the influence of the NaCl content on the penetration of chlorides in cementitious matrices submitted to the immersion and drying cycles; The influence of the presence of calcium hydroxide in the wetting solution; The influence of the presence of carbon dioxide (CO₂) in the drying phase; The influence of wetting and drying days for short cycles and long cycles; And finally the influence of the total immersion and drying period. For this, cubic specimens with 5 cm of edge were moulded in mortar using CEM I 42.5 cement and water / binder ratio 0.5. After 30 days of curing the specimens were submitted to six different immersion and drying cycles, as well as the immersion test for 60 days. At the end of the test period the specimens were broken perpendicular to the exposed face and the depth of penetration of chlorides was evaluated by spraying a silver nitrate solution at the breaking section and in the samples which in the drying phase had the presence of CO₂, half of the sample was sprinkled with silver nitrate and the other half with phenolphthalein.

The results point to a relevant role of the NaCl concentration in this type of assay, under the conditions studied. This confirms the importance of continuing to study the variables involved in this type of test in order to move more and more towards standardization.

KEYWORDS: Mortar; accelerated test; immersion; drying; chloride ions.

ÍNDICE

1 ENQUADRAMENTO	1
1.1 Introdução	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da Dissertação.....	2
2 ESTADO DO CONHECIMENTO.....	5
2.1 Durabilidade do betão	5
2.1.1 Vida útil.....	10
2.1.2 Corrosão	13
2.2 Penetração de cloretos no betão	20
2.2.1 Permeação/Permeabilidade	21
2.2.2 Absorção capilar	26
2.2.3 Difusão	28
2.2.4 Migração	31
2.3 Fatores que influenciam a penetração de cloretos	33
2.3.1 Relação água/cimento	34
2.3.2 Tempo de cura.....	35
2.3.3 Quantidade de C ₃ A no cimento.....	37
2.3.4 Temperatura	38
2.3.5 Humidade relativa	38
2.3.6 Tipo de cimento	39
2.3.7 Fissuração.....	39
2.3.8 Condições de exposição	39
2.3.9 Resistividade elétrica	42
2.3.10 Utilização de cal	43
2.4 Ensaios utilizados para medir a penetração de cloretos	43
2.4.1 Ensaio de migração	44
2.4.2 Câmara de névoa salina.....	45
2.4.3 Ciclos de imersão e secagem	46
2.4.4 Difusão natural	52
2.5 Métodos de determinação de cloretos no betão	53

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	57
3.1 Introdução.....	57
3.2 Caracterização dos materiais no estudo.....	57
3.2.1 Água	57
3.2.2 Cimento	57
3.2.3 Agregado fino.....	58
3.3 Preparação dos provetes	58
3.3.1 Análise granulométrica.....	59
3.3.2 Produção da argamassa e preparação dos provetes	60
3.4 Características das argamassas	63
3.4.1 Estado fresco.....	63
3.4.2 Estado endurecido.....	64
3.5 Ensaio acelerado – Ciclos de imersão e secagem.....	66
3.5.1 Variação do tempo de molhagem/secagem	67
3.5.2 Variação da percentagem de NaCl	67
3.5.3 Presença ou não de hidróxido de cálcio.....	67
3.5.4 Presença ou não de CO ₂ na secagem.....	67
3.5.5 Situações de estudo.....	68
3.5.6 Realização do ensaio	71
4 RESULTADOS.....	73
4.1 Introdução.....	73
4.2 Caracterização das argamassas.....	73
4.2.1 Resultado do ensaio de resistência à compressão.....	73
4.2.2 Resultado do ensaio de absorção de água por capilaridade.....	74
4.2.3 Resultado do ensaio de absorção de água por imersão.....	75
4.3 Ensaio acelerados.....	76
4.3.1 Ciclos de imersão e secagem - 7 dias	76
4.3.2 Ciclos de imersão e secagem - 14 dias	79
4.3.3 Imersão por difusão - 60 dias	82
5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	85
5.1 Influência do teor de NaCl na solução de molhagem sobre a penetração de cloretos	85

5.1.1 Ciclos curtos – 7 dias	85
5.1.2 Ciclos longos – 14 dias	87
5.1.3 Imersão – 60 dias	89
5.2 Influência da presença de hidróxido de cálcio na solução de molhagem sobre a penetração de cloretos	91
5.2.1 Ciclos curtos – 7 dias	91
5.2.2 Ciclos longos – 14 dias	93
5.3 Influência da presença de CO ₂ no ambiente de secagem sobre a penetração de cloretos	96
5.3.1 Ciclos curtos – 7 dias	96
5.3.2 Ciclos longos – 14 dias	98
5.4 Influência do período total dos ciclos sobre o resultado	102
5.5 Influência do período de secagem.....	105
5.5.1 Influência do período de secagem para ciclos curtos (7 dias).....	105
5.5.2 Influência do período de secagem para ciclos longos (14 dias).....	109
6 CONCLUSÕES.....	113
6.1 Conclusões gerais.....	113
6.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	114
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Metodologia para a implementação de um modelo para a previsão da vida útil de componente de construção [2].	6
Figura 2.2 - Relações entre os principais fatores que influenciam a durabilidade dos elementos de betão armado [10].....	7
Figura 2.3 - Influência da razão A/C na penetração de cloretos [15].	9
Figura 2.4 - Efeito do menor ou maior acesso de oxigénio [1].....	9
Figura 2.5 - Vida útil de uma estrutura [10].	11
Figura 2.6 - Modelo concetual de vida útil de Tuutti (1982) [6].	12
Figura 2.7 - Processo metalúrgico [9].	14
Figura 2.8 - Esquema do mecanismo de degradação para a corrosão [2].	14
Figura 2.9 - Corrosão por picadas [23].	17
Figura 2.10 - "Crateras" [9].....	17
Figura 2.11 - Exemplo de corrosão uniforme [24].....	18
Figura 2.12 - Elementos do mecanismo de corrosão [26].....	19
Figura 2.13 - Tipos de corrosão da armadura [25].....	20
Figura 2.14 - Mecanismos de transporte numa estrutura de betão em ambiente marítimo [7].	21
Figura 2.15 - Distribuição de poros de uma estrutura de betão [28].....	22
Figura 2.16 - Diferença entre permeabilidade e porosidade [28].	23
Figura 2.17 - Relação entre a porosidade capilar numa pasta de cimento e o coeficiente de permeabilidade [5].	23
Figura 2.18 - Relação entre a razão A/C e o coeficiente de permeabilidade [5].	23

Figura 2.19 - Redução da permeabilidade da pasta de cimento com o aumento do tempo [5].	24
Figura 2.20 - Equipamento utilizado no LNEC para o ensaio de permeabilidade à água [29].	25
Figura 2.21 - Equipamento para determinação da profundidade de penetração de água sob pressão [29].	26
Figura 2.22 - Curva de absorção de água por capilaridade [16].	27
Figura 2.23 - Difusão de oxigénio e dióxido de carbono para condições diferentes de humidade relativa [5].	29
Figura 2.24 - Esquema do teste de migração de cloretos AASHTO T277 [37].	31
Figura 2.25 - Esquema de ensaio de migração de cloretos em regime não estacionário [40].	33
Figura 2.26 - Influência da razão a/l na penetração de cloretos [23].	35
Figura 2.27 - Influência do período de cura na difusibilidade de iões cloreto [23].	36
Figura 2.28 - Influência da variação da dosagem de cimento e razão a/l na penetração de cloretos.	37
Figura 2.29 - Mecanismos de penetração de cloretos na zona atmosférica e rebentação [46].	42
Figura 2.30 - Influência do teor de cloretos e da humidade na resistividade elétrica [55].	42
Figura 2.31 - Representação esquemática do ensaio [60].	45
Figura 2.32 - Penetração de cloretos através do mecanismo de molhagem (figura da esquerda) e secagem (figura da direita) [7].	47
Figura 2.33 - Penetração de cloretos em ambiente aéreo (humidade relativa constante) e ambiente sujeito a ciclos molhagem/secagem [7].	47
Figura 2.34 - Arranjo experimental utilizado no método da difusão natural [32].	52
Figura 2.35 - Separação da zona de cor branca com separação de cloretos e zona de cor castanha com ausência dos mesmos.	55
Figura 2.36 - Medidas da penetração de cloretos [39].	55

Figura 3.1 - Agitação manual.....	59
Figura 3.2 - Agitação com auxílio mecânico.	59
Figura 3.3 - Curva granulométrica do agregado.	60
Figura 3.4 - Auxílio de uma espátula para tentar garantir que todos os componentes fiquem corretamente associados.....	61
Figura 3.5 - Colocação das duas camadas de argamassa no molde.	62
Figura 3.6 - Processo de pintura dos cubos com tinta epóxi.....	62
Figura 3.7 - Procedimento do ensaio de espalhamento.....	63
Figura 3.8 - Ensaio de capilaridade em curso.	64
Figura 3.9 - Rompimento dos provetes.....	72
Figura 3.10 - Provetes aspergidos com nitrato de prata (a) e fenolftaleína e nitrato de prata (b).	72
Figura 4.1 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão para 7, 28 e 90 dias.....	73
Figura 4.2 - Cinética da absorção capilar do período de ensaio de 20 dias.	74
Figura 4.3 - Gráfico de determinação da absorção capilar	75
Figura 4.4 - Profundidade de penetração média de cloretos do ensaio de 7 dias para a situação A.....	76
Figura 4.5 - Média de penetração de cloretos do ensaio de 7 dias para a situação B.	77
Figura 4.6 - Média de penetração de cloretos do ensaio de 7 dias para a situação C.	77
Figura 4.7 - Média de penetração de cloretos do ensaio de 7 dias para a situação D.	78
Figura 4.8 - Média de penetração de cloretos do ensaio de 7 dias para a situação E.	78
Figura 4.9 - Média de penetração de cloretos do ensaio de 14 dias para a situação A.	79
Figura 4.10 - Média de penetração de cloretos do ensaio de 14 dias para a situação B.	80

Figura 4.11 - Média de penetração de cloretos do ensaio de 14 dias para a situação C.....	80
Figura 4.12 - Média de penetração de cloretos do ensaio de 14 dias para a situação D.....	81
Figura 4.13 - Média de penetração de cloretos do ensaio de 14 dias para a situação E.....	81
Figura 4.14 - Médias de penetração de cloretos do ensaio de difusão de 60 dias para a situação AD, BD, CD e DD.....	82
Figura 5.1 - Média de penetração de cloretos para as situações de dois dias de molhagem e cinco de secagem com 3,5%, 5% e 10% de NaCl, A1, B1 e C1, respetivamente.....	85
Figura 5.2 - Média de penetração de cloretos para as situações de três dias de molhagem e quatro de secagem com 3,5%, 5% e 10% de NaCl, A2, B2 e C2, respetivamente.....	86
Figura 5.3 - Média de penetração de cloretos para as situações de quatro dias de molhagem e três de secagem com 3,5%, 5% e 10% de NaCl, A3, B3 e C3, respetivamente.....	87
Figura 5.4 - Média de penetração de cloretos para as situações de sete dias de molhagem e sete de secagem com 3,5%, 5% e 10% de NaCl, AA, BA e CA, respetivamente.....	88
Figura 5.5 - Média de penetração de cloretos para as situações de sete dias de molhagem e sete de secagem com 3,5%, 5% e 10% de NaCl, AB, BB e CB, respetivamente.....	88
Figura 5.6 - Média de penetração de cloretos para as situações de oito dias de molhagem e seis de secagem com 3,5%, 5% e 10% de NaCl, AC, BC e CC, respetivamente.....	89
Figura 5.7 - Média de penetração de cloretos para a situação de imersão com 3,5%, 5% e 10% de NaCl, AC, BC e CC, respetivamente.....	90
Figura 5.8 - Média de penetração da situação A1 e D1 em cm.....	91
Figura 5.9 - Média de penetração da situação A2 e D2 em cm.....	92
Figura 5.10 - Média de penetração da situação A3 e D3 em cm.....	92
Figura 5.11 - Média de penetração da situação AA e DA em cm.....	93
Figura 5.12 - Média de penetração da situação AB e DB em cm.....	94

Figura 5.13 - Média de penetração da situação AC e DC em cm.	94
Figura 5.14 - Média de penetração para as situações A e D.	95
Figura 5.15 - Média de penetração da situação A1 e E1 em cm.	97
Figura 5.16 - Média de penetração da situação A2 e E2 em cm.	97
Figura 5.17 - Média de penetração da situação A3 e E3 em cm.	98
Figura 5.18 - Média de penetração da situação AA e EA em cm.	99
Figura 5.19 - Média de penetração da situação AB e EB em cm.	99
Figura 5.20 - Média de penetração da situação AC e EC em cm.	100
Figura 5.21 - Média de penetração as situações A e E para ciclos de imersão e secagem de sete dias (a) e catorze dias (b).	101
Figura 5.22 - Média de penetração de cloretos da situação A com ciclos de sete (A1, A2 e A3) e catorze dias (AA, AB e AC).	102
Figura 5.23 - Média de penetração de cloretos da situação B com ciclos de sete (B1, B2 e B3) e catorze dias (BA, BB e BC).	103
Figura 5.24 - Média de penetração de cloretos da situação C com ciclos de sete (C1, C2 e C3) e catorze dias (CA, CB e CC).	103
Figura 5.25 - Média de penetração de cloretos da situação C com ciclos de sete (D1, D2 e D3) e catorze dias (DA, DB e DC).	104
Figura 5.26 - Média de penetração de cloretos da situação E com ciclos de sete (E1, E2 e E3) e catorze dias (EA, EB e EC).	104
Figura 5.27 - Média de penetração de cloretos da situação A para ciclos de 7 dias (A1, A2 e A3).	105
Figura 5.28 - Média de penetração de cloretos da situação B para ciclos de 7 dias (B1, B2 e B3).	106

Figura 5.29 - Média de penetração de cloretos da situação C para ciclos de 7 dias (C1, C2 e C3).....	107
Figura 5.30 - Média de penetração de cloretos da situação D para ciclos de 7 dias (D1, D2 e D3).....	107
Figura 5.31 - Média de penetração de cloretos da situação E para ciclos de 7 dias (E1, E2 e E3).	108
Figura 5.32 - Média de carbonatação para a situação E com ciclos de 7 dias (E1, E2 e E3).	108
Figura 5.33 - Média de penetração de cloretos da situação A para ciclos de 14 dias (AA, AB e AC).	109
Figura 5.34 - Média de penetração de cloretos da situação B para ciclos de 14 dias (BA, BB e BC).	110
Figura 5.35 - Média de penetração de cloretos da situação C para ciclos de 14 dias (CA, CB e CC).	110
Figura 5.36 - Média de penetração de cloretos da situação D para ciclos de 14 dias (DA, DB e DC).	111
Figura 5.37 - Média de penetração de cloretos da situação E para ciclos de 14 dias (EA, EB e EC).....	111

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação do coeficiente de permeabilidade em função da qualidade do betão.	26
Tabela 2.2 - Classificação da qualidade do betão de acordo com o coeficiente de absorção obtido através da especificação do LNEC E393:1993 [31].	28
Tabela 2.3 - Classes de resistência do betão à penetração de cloretos [16].	33
Tabela 2.4 - Coeficientes de difusão de cloretos para diferentes composições de betão [44]. 34	
Tabela 2.5 - Coeficiente de difusão em função da relação a/l e da temperatura [45].	35
Tabela 2.6 - Acréscimo de tempo para iniciar a corrosão em função do teor de C ₃ A [47].	37
Tabela 2.7 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos em argamassas em função da variação da humidade relativa e da exposição ao NaCl [52].	39
Tabela 2.8 - Classes de exposição ambiental, para estruturas sujeitas a corrosão induzida por cloretos [53] e [18].	40
Tabela 2.9 - Limites da composição e da classe de resistência do betão sob ação dos cloretos, para uma vida útil de 50 anos [53].	41
Tabela 2.10 - Referências bibliográficas onde foram utilizados os ensaios de imersão	49
Tabela 3.1 - Composição química do cimento CEM I 42,5R [84].	58
Tabela 3.2 - Propriedades físicas do cimento CEM I 42,5R [84].	58
Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas do cimento CEM I 42,5 R [84].	58
Tabela 3.4 - Tempo de pesagens dos provetes no ensaio de absorção de água por capilaridade.	65
Tabela 3.5 - Variáveis nos ciclos.	68
Tabela 3.6 - Situação de referência A.	68
Tabela 3.7 - Situação B com variação de NaCl.	69

Tabela 3.8 - Situação C com variação de NaCl.....	69
Tabela 3.9 - Situação D com presença de hidróxido de cálcio.....	70
Tabela 3.10 - Situação E com presença de CO ₂ na secagem.....	70
Tabela 3.11 - Composição das diferentes caixas.....	71

1 ENQUADRAMENTO

1.1 Introdução

De forma a garantir a sustentabilidade das estruturas de betão armado é primordial garantir a sua durabilidade. Ao longo das últimas décadas têm vindo a aumentar as preocupações relacionadas com a durabilidade do betão. Sendo este o material mais utilizado na construção e, tendo sido verificado um elevado aumento de casos de deterioração precoce, o estudo da durabilidade deste material assume uma enorme importância na indústria da construção [1].

Estas preocupações tiveram início na década de 70, quando as estruturas, que até à data eram consideradas com vida útil infinita, começaram a exibir, em determinadas condições, deterioração precoce. Posteriormente, este facto fez com que, no final dos anos 80 e 90, a durabilidade fosse observada como um vigoroso ponto de pesquisa, permitindo, posteriormente, desenvolver numerosos estudos e definições alusivos ao tema como é o caso de Ferreira (2006) [2], Carminho (2012) [3] e Malheiro *et al.* (2014) [4]. Estima-se que nos países desenvolvidos são aplicados em reparações e manutenções das estruturas existentes cerca de 40% do total dos recursos da indústria da construção [5].

Segundo Pigeon (1996) *apud* Camacho (2015) [1], a penetração de cloretos é a principal causa da deterioração das estruturas de betão por todo o mundo. Uma vez que esta penetração acontece de forma relativamente lenta, os ensaios acelerados são uma alternativa recorrente na literatura. Dentro destes ensaios os que adquirem maior relevância são os ensaios de migração, difusão e imersão/secagem. Os ciclos de imersão em cloretos e secagem ao ar, apesar de ainda não serem normalizados, são cada vez mais utilizados quando se deseja acelerar a penetração de cloretos [6]. É um processo que se baseia em duas principais etapas, onde numa primeira fase de molhagem os cloretos dissolvidos penetram no betão por absorção capilar e, numa segunda fase, momento de secagem, estes iões permanecem no interior dos poros, juntamente com moléculas de água que formam a película que reveste o interior do poro [7]. Castro *et al.* (2001) [8], diz-nos que um fator importante a ser considerado neste ensaio, é a capacidade de recriação da realidade, uma vez que em determinadas condições ambientais o betão em exposição natural encontra-se sujeito aos ciclos de molhagem e secagem.

Inúmeras variáveis podem interferir no resultado final do ensaio em questão como, por exemplo, o teor de NaCl na solução, o tipo de sal utilizado, a temperatura da solução de imersão, as condições do ambiente de secagem, a presença de hidróxido de cálcio na solução de imersão, entre outros. Assim, a falta de normas ou especificações que orientem a execução do ensaio de imersão e secagem, de acordo com os objetivos que se pretendem alcançar, dificulta a comparação entre os resultados das inúmeras pesquisas já desenvolvidas, limitando o avanço do conhecimento.

Desta forma, dada a importância do tema e a lacuna ainda existente na literatura, o trabalho experimental está focado no estudo de variáveis que possam vir a interferir no mecanismo do ensaio de imersão e secagem e da sua influência sobre os resultados finais alcançados.

1.2 Objetivos

Devido à falta de normalização acerca deste tema e aos poucos registros de trabalhos de investigação que contemplem o assunto, o objetivo principal do trabalho consiste em investigar a forma como alguns fatores, inerentes à execução do ensaio de imersão e secagem, podem influenciar no resultado final deste ensaio em amostras de argamassa com elevada relação água/ligante.

Especificamente, pretende-se estudar:

- A influência do período total de ensaio;
- A influência do período de molhagem e secagem;
- A influência da presença de hidróxido de cálcio na solução de molhagem;
- A influência da presença de CO₂ no ambiente de secagem.

1.3 Estrutura da Dissertação

A estrutura da dissertação baseia-se em seis principais capítulos:

- Capítulo 1 - Enquadramento: este capítulo possui um carácter introdutório onde, de maneira geral, são introduzidas as temáticas constituintes da dissertação, bem como os objetivos inerentes à mesma.
- Capítulo 2 - Estado do conhecimento: ao longo deste capítulo são abordadas algumas considerações gerais do betão ao nível da sua evolução histórica e durabilidade. Também são explicados os mecanismos de penetração de cloretos e descritos os fatores que influenciam a penetração dos mesmos. Por último, são descritos os ensaios

utilizados para medir a penetração de cloretos, bem como os métodos utilizados para a determinação dos mesmos.

- Capítulo 3 - Procedimento experimental: numa fase inicial são apresentados de forma detalhada todos os materiais utilizados para a constituição da argamassa, a forma como a mesma foi preparada e apresentadas as características no estado fresco e no estado endurecido. Para finalizar o capítulo são apresentadas todas as variáveis utilizadas no estudo dos ciclos de imersão e secagem.
- Capítulo 4 - Resultados: aqui são apresentados todos os resultados relacionados com a caracterização das argamassas e dos ensaios acelerados de imersão e secagem.
- Capítulo 5 - Análise e discussão dos resultados: neste capítulo os resultados obtidos são analisados e discutidos com base na experiência laboratorial adquirida e na revisão bibliográfica apresentada.
- Capítulo 6 - Conclusões: aqui são apresentadas as conclusões referentes aos ensaios laboratoriais realizados, acrescentando sugestões para trabalhos futuros.

2 ESTADO DO CONHECIMENTO

2.1 Durabilidade do betão

Considera-se durável aquela estrutura de betão que, ao longo da vida, conserva os requisitos de projeto em termos de segurança, de funcionalidade e estética, sem apresentar custos de manutenção não previstos [1].

O betão armado, durante um largo período de anos, foi considerado um material com grande durabilidade, considerado com uma vida útil praticamente infinita. Entretanto, em meados do século XX, nomeadamente por volta de 1970, o betão armado começou a apresentar em determinadas condições algumas patologias que podem comprometer o seu aspeto estético e na maioria das vezes comprometem também a capacidade resistente, podendo levar até ao colapso parcial ou total da estrutura. Outro aspeto relevante e, portanto, não menos importante, prende-se com os avultados custos de reparação e reabilitação, que muitas das vezes podem ascender a cerca de 50% dos custos de construção [9].

A nível mundial, tem-se presenciado uma degradação inesperada das estruturas de betão armado, como por exemplo nos Estados Unidos da América onde metade das pontes estavam afetadas pela corrosão, estando 40 % destas consideradas deficientes a nível estrutural [2]. Outras investigações mostram que mais de 50% de todas as grandes pontes ao longo da costa Norueguesa sofrem problemas de corrosão ou já tinham sido reparadas devido a problemas de corrosão [2].

Bakker (1991) *apud* Camacho (2015) [1] afirma que a durabilidade geral de uma estrutura não é homogénea, uma vez que a mesma resulta da conjugação de diferentes materiais que apresentam diferentes durabilidades individuais. Outro fator que afeta diretamente a durabilidade da estrutura, para além da durabilidade individual dos materiais, é a sua forma de execução. Para uma estrutura ser durável é essencial ter boas práticas de execução e acabamento, onde se aplica diretamente ao betão que, quando bem concebido, compactado e curado, pode ser bastante durável [1].

Segundo Monteiro (2010) [2], existem duas estratégias para abordar um projeto de durabilidade. A primeira estratégia consiste em evitar a degradação da estrutura isolando a agressividade do meio envolvente, podendo-se subdividir em três diferentes tipos de medidas:

em primeiro lugar mudar o micro ambiente recorrendo, por exemplo, a membranas ou revestimentos; em segundo selecionar materiais não reativos, como agregados, cimentos resistentes a sulfatos ou cimentos com baixo teor de alcalis; por último inibir as reações recorrendo a proteção catódica ou introduzindo ar, por exemplo. A segunda estratégia compreende em selecionar e aplicar composições de materiais e detalhes estruturais para resistir, durante um período de uso singular, à degradação da estrutura. Nesta segunda estratégia as estruturas podem caracterizar-se como mais resistentes à agressividade do meio se adotarmos procedimentos adequados que diminuam a superfície exposta, como um recobrimento apropriado ou uma composição de betão adequada podem impedir ou atrasar a corrosão das armaduras (Figura 2.1).

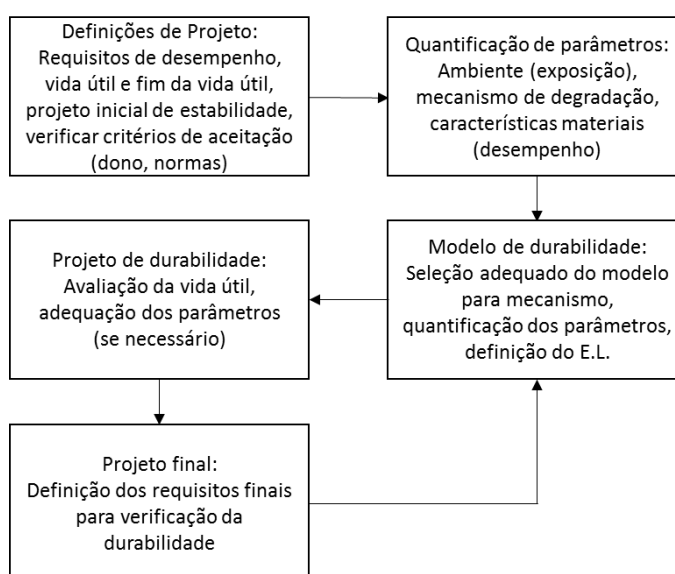


Figura 2.1 - Metodologia para a implementação de um modelo para a previsão da vida útil de componente de construção [2].

Definindo “desempenho” como a capacidade de uma estrutura satisfazer os fins para que foi projetada, sob todos os pontos de vista, é de opinião geral que, devido aos efeitos complexos do meio ambiente sobre as estruturas e de todas as reações que isso envolve, a melhoria do desempenho ao longo da vida não pode ser apenas obtida pelo aumento da qualidade dos materiais usados [10]. Dito isto, poderemos ter conta outras vertentes que nos possamos guiar: em fase de projeto de estrutura e arquitetura, a nível de processos de execução da obra e nos procedimentos relativos à inspeção e manutenção [10].

Na Figura 2.2 encontram-se resumidas as relações entre os principais fatores que influenciam a durabilidade dos elementos de betão armado e as suas consequências em termos de desempenho.

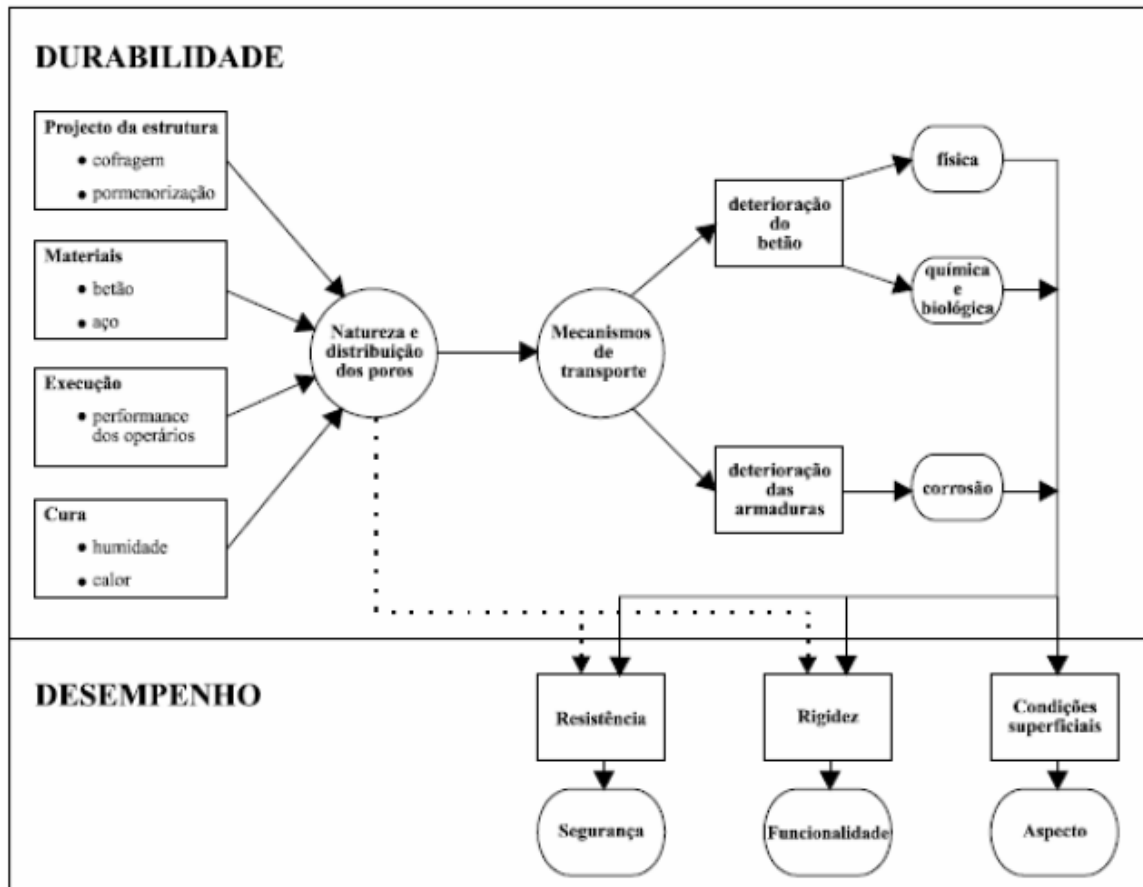


Figura 2.2 - Relações entre os principais fatores que influenciam a durabilidade dos elementos de betão armado [10].

Segundo Monteiro (2010) [10], de uma forma geral os principais fatores que afetam a durabilidade são o projeto estrutural (pormenorização e cofragem), os materiais (principalmente compostos de betão e armaduras), a sua execução (principalmente o desempenho dos operários como por exemplo a vibração do betão) e a cura (em termos de humidade e calor). São estes os quatro fatores que com maior gravidade influenciam a qualidade da estrutura do betão armado no sentido em que definem a distribuição e natureza dos poros [10].

Para Coutinho (1998) [7], a deterioração das estruturas de betão é gravemente afetada pelo transporte de gases, de água e de agentes agressivos dissolvidos em água, onde o grau de facilidade deste transporte depende maioritariamente da rede porosa e das condições ambientais a que a superfície do betão se encontra sujeita. A razão água/ligante, grau de hidratação e tipo de cimento afetam diretamente a quantidade e dimensão de poros capilares onde existem três principais fluidos responsáveis e relevantes para a durabilidade do betão: a água, pura ou combinada com iões agressivos, o dióxido de carbono e o oxigénio [1].

Os dois principais mecanismos de degradação ocorrem devido a dois principais fatores, sendo eles a carbonatação e a ação dos iões cloreto [6]. A carbonatação é importante destacar, sendo que ocorre com maior frequência nos centros urbanos onde a emissão de CO₂ é mais elevada [1].

O transporte dos iões cloreto para o interior do betão é um processo que ocorre apenas em meio líquido, isto é, se os poros não contiverem água não existe penetração, pois é através da estrutura porosa do betão que se processa a penetração. A penetração pode ocorrer através de vários mecanismos de transporte sendo eles a permeação, sucção capilar e difusão [11]. Vários mecanismos do transporte de iões cloreto têm sido estudados ao longo dos anos, como é o caso de trabalhos de Cerný *et al.* (2004) [12] e de Wang *et al.* (2005) [13] que tratam do transporte de iões cloreto no betão.

Para Han *et al.* (2013) [14], a corrosão das armaduras continua a ser uma das principais causas dos problemas de durabilidade em estruturas de betão, onde esta deterioração neste tipo de estruturas é claramente superior na presença de ácidos, sulfatos, gelo/degelo e reações alcalis-agregado, a atacar inicialmente o betão de recobrimento e, numa fase posterior, as armaduras devido ao dióxido de carbono e aos iões cloreto.

Para Costa (2013) [15], a composição do betão é o fator que mais influencia a penetração dos cloretos ao nível de dois principais fatores:

- Razão água/ligante: este parâmetro controla a dimensão e continuidade da estrutura porosa do betão e tem uma ação importante na limitação da penetração por absorção e permeação (Figura 2.3);

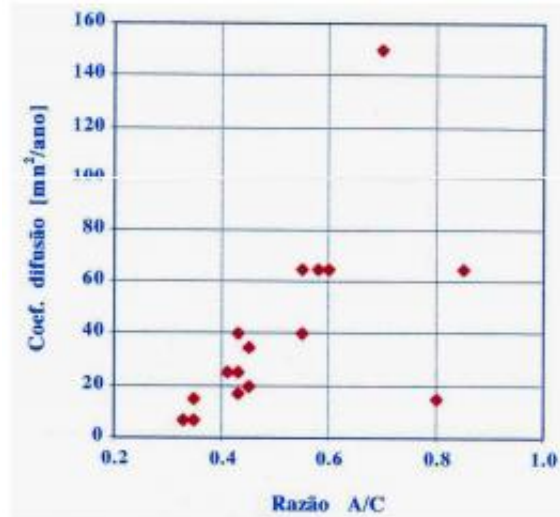


Figura 2.3 - Influência da razão A/C na penetração de cloretos [15].

- Quantidade e composição do cimento: a quantidade de cimento influencia a fixação dos cloretos no betão.

A armadura no interior do betão é constituída por uma proteção física, designada de betão de recobrimento, e uma proteção química, que corresponde a uma camada que é formada por uma fina capa de óxidos, compacta e aderente à superfície do aço, estável em meio alcalino [1]. A eficiência da barreira física composta pela camada exterior de betão depende da sua espessura e da sua qualidade, em particular das propriedades de transporte das espécies químicas despassivantes e dos agentes indispensáveis à progressão dos fenómenos de corrosão, nomeadamente a água e o oxigénio (Figura 2.4).

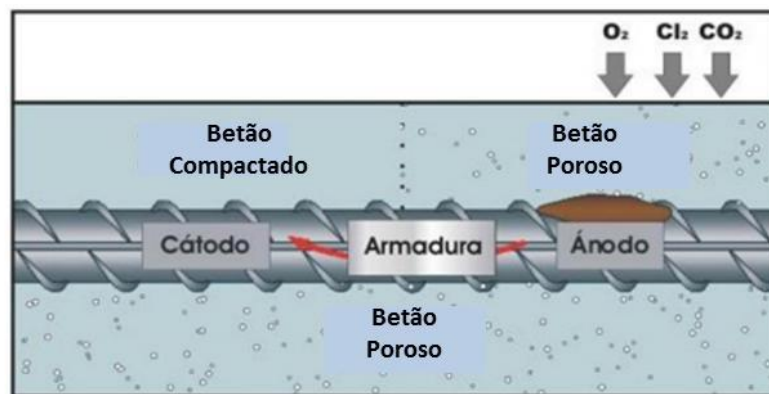


Figura 2.4 - Efeito do menor ou maior acesso de oxigénio [1].

Camões (2002) [16], diz-nos que a película passivante pode ser eliminada, causando a despassivação do aço devido, substancialmente, à diminuição da alcalinidade do betão por ação da carbonatação ($\text{pH} < 11,5$), que atua de uma forma universalizada, e pela presença de iões cloreto junto das armaduras, que em teores superiores a um determinado valor crítico, acidifica-as de forma profunda e localizada.

2.1.1 Vida útil

Define-se vida útil de um elemento estrutural ou material, o período de tempo depois da colocação em serviço, durante o qual todas as suas propriedades excedem os valores mínimos admissíveis quando submetido a ações de manutenção periódicas. Em suma, as estruturas devem ser projetadas e construídas para que as condições ambientais previstas na época de projeto e quando utilizadas conforme preconizadas, consigam preservar a sua segurança, firmeza e aptidão em serviço durante um período similar à sua vida útil [17].

Define-se vida residual de uma estrutura de betão armado como o período de tempo a partir do qual o desempenho da estrutura se torna intolerável. Nestas situações serão necessárias intervenções e proceder a reparações na estrutura de forma a repor novamente as condições de funcionalidade, segurança e estéticas análogas às do projeto [10].

Já a norma NP EN 206-1 [18] descreve vida útil, 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”.

Nestes últimos anos tem decorrido um interesse crescente pelo desenvolvimento de modelos para estimar o tempo de vida útil das estruturas de betão armado. No entanto, devido ao elevado número de parâmetros envolvidos este estudo não tem sido fácil. Dados como as características dos materiais, da estrutura e sua evolução ao longo do tempo e mecanismos de deterioração e sua interpenetração são imprescindíveis para uma previsão minimamente fiável [2].

Apesar de não ser uma investigação direta e simples, não se pode por inteiro ignorar uma vez que toda a degradação envolvida vai influenciar o desempenho da estrutura em causa como se pode observar na Figura 2.5.

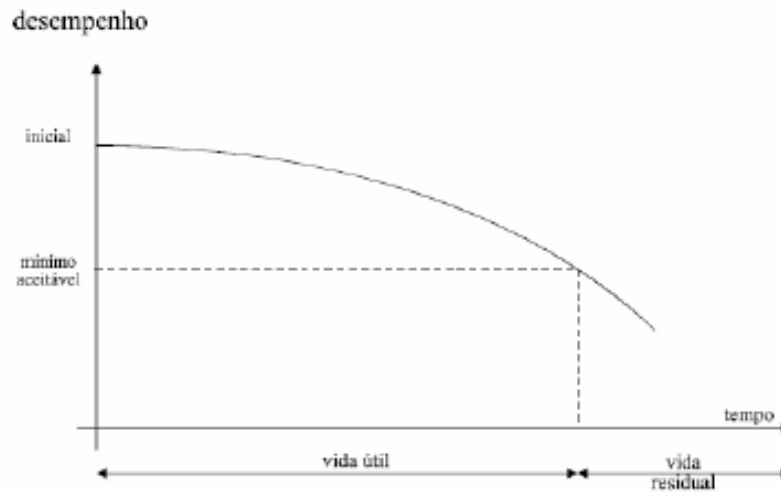


Figura 2.5 - Vida útil de uma estrutura [10].

Ao longo dos anos foram-se desenvolvendo vários procedimentos para prever a vida útil de elementos de betão armado. Inicialmente surgiram abordagens de estimativas fundamentadas em conhecimentos e experiências adquiridas, caracterizada por ser uma metodologia muito simplista e que somente se tornou possível devido à acumulação de conhecimento e experiência adquiridos na elaboração de testes de campo e de laboratório. No entanto, com os avanços tecnológicos, e com a inserção de novos materiais no mercado construtivo, e considerando também o aumento da severidade do ambiente natural, estas abordagens foram-se tornando de difícil realização e com algumas incoerências.

Monteiro [10], diz-nos que podemos reconhecer duas formas de abordagem na determinação da vida útil das estruturas. A primeira trata-se de um método experimental, que se apoia em ensaios de deterioração através dos quais se solicita a reprodução das condições e os agentes agressivos a que se prevê que a estrutura se encontrará submetida ao longo do tempo. A segunda abordagem encontra-se mais inclinada para uma via analítica, recorrendo a modelos matemáticos que solicitam reproduzir os efeitos dos agentes agressivos ao longo do tempo. Estes métodos analíticos podem ser discriminados em determinísticos ou probabilísticos conforme sejam desenvolvidos para um número específico ou para um conjunto de valores relacionado a probabilidades de ocorrência [19].

A abordagem determinística fornece sempre um valor médio de degradação, desempenho ou vida útil, que se apoia em mecanismos de transporte de gases, massas e iões através dos poros, sendo os principais mecanismos envolvidos a permeabilidade, absorção capilar, difusão de

iões e migração de iões. Já a abordagem probabilística surge na continuação do facto de muitas deliberações no âmbito da engenharia civil serem tomadas sob condições de incerteza, onde se faz uma apropriada quantificação das aleatoriedades, bem como a averiguação dos seus efeitos dentro de um todo [19].

Das várias abordagens estudadas, a que se encontra mais patentada na bibliografia é o modelo de Tuutti [20], devido à sua exaustiva experimentação, produzindo uma abordagem sobre o fenómeno da corrosão em estruturas de betão armado. Este autor propõe um modelo simplificado de abordagem da vida útil para as estruturas de betão armado, considerando a degradação devido ao fenómeno da corrosão das armaduras.

Tal fenómeno pode ser exposto, segundo o modelo de Tuutti [20], através de uma fase de iniciação e outra fase de propagação da corrosão (Figura 2.6). Este modelo, apesar de qualitativo e concetual, tem sido amplamente citado devido à sua simplicidade descritiva e utilidade na análise do fenómeno de corrosão [21].

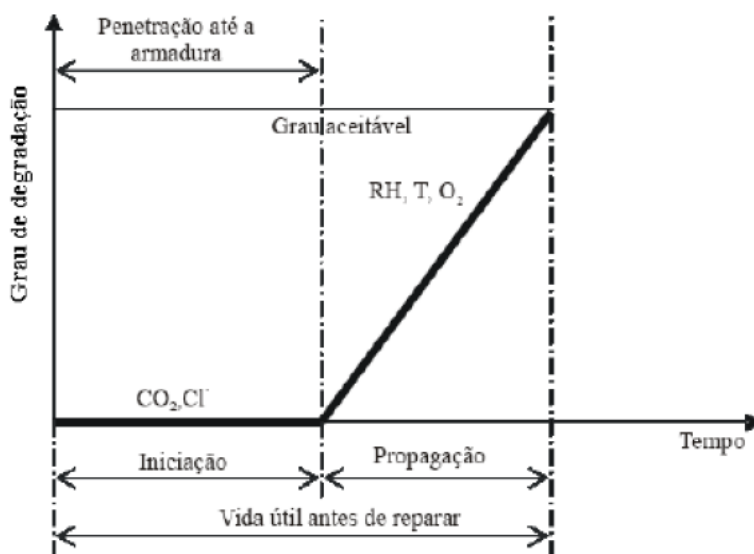


Figura 2.6 - Modelo conceitual de vida útil de Tuutti (1982) [6].

O período de iniciação da corrosão corresponde ao período no qual os agentes agressivos são conduzidos através do recobrimento, alcançam a armadura e provocam a sua despassivação (Tuutti (1993) *apud* Malheiro (2008) [6]). Segundo Cascudo (1997) [22], a despassivação pode ocorrer perante duas conjunturas principais: presença de uma quantidade suficiente de iões cloreto e diminuição da alcalinidade do betão. Este período depende das características

de agressividade do meio em que a estrutura se encontra exposta e das características dos materiais, como é o caso do tipo de ligante e a permeabilidade do betão de recobrimento.

Após a despassivação, o processo corrosivo começa efetivamente a instalar-se com o início do período de propagação [22]. A fase de propagação caracteriza-se pelo desenvolvimento das reações de corrosão, onde estas podem ser mais ou menos rápidas em função das variáveis que conferem a cinética das reações, ou seja, em função da disponibilidade de oxigénio, da resistividade do meio, da temperatura, etc. [20].

No período da propagação, a corrosão da armadura começa a desenvolver-se com a formação da pilha eletroquímica e estende-se até que a estrutura chegue a um grau de deterioração inaceitável, seja do ponto de vista da segurança da funcionalidade ou, ainda, da estética [6]. Entretanto, deve-se evidenciar que a corrosão das armaduras não é um processo contínuo, podendo ser descontinuado a qualquer momento, pela carência de qualquer fator necessário para que o mesmo continue ocorrendo [21]. Este nível de deterioração está relacionado com os estados limite definidos, por exemplo, pelos modelos de corrosão. Grande parte dos modelos de corrosão utilizam o Estado Limite de Utilização (ELUt), que na maioria dos casos é considerado como o início da fendilhação do betão de recobrimento causada pela corrosão da amadura ou despassivação da armadura ([1]).

2.1.2 Corrosão

a) Definições

Após uma vasta pesquisa de diversos autores acerca da definição de corrosão penso que parece existir um consenso sobre a mesma.

Citado por Cascudo (1997) [22], corrosão metálica aparece como sendo “a transformação de um metal em ião metálico pela sua interação química ou eletroquímica com o meio em que se encontra”.

Já Helene, (1986) *apud* Monteiro (2010) [10], introduz o conceito de corrosão como uma interação de um material com o ambiente quer por reação química, quer por reação eletroquímica.

Gentil, 2003 *apud* Polito (2006) [9] transmite-nos uma definição muito transversal a todas anteriormente citadas, acrescentando, que em alguns casos, a corrosão se assemelha ao

inverso do processo metalúrgico (Figura 2.7), arrematando ao afirmar que “o produto da corrosão de um metal é bem semelhante ao minério do qual é originalmente extraído”.



Figura 2.7 - Processo metalúrgico [9].

Os metais nobres como a prata e o ouro são estáveis e já os podemos encontrar na natureza sob a forma metálica. Todos os outros metais são encontrados sob a forma de minérios, sendo imprescindível nestes casos a utilização do processo metalúrgico, de modo a fornecer energia e transformá-lo num metal. Estando o metal estável, ao surgirem situações de perda de energia, existirá a corrosão e o retorno à sua composição original.

Ferreira (2006) [2], diz-nos que o mecanismo de corrosão é dividido em duas principais fases designadas de fase de iniciação e fase de propagação. Na primeira, o betão não é danificado, no entanto a frente de cloretos progride para o interior até alcançar a armadura. Na segunda, na presença de oxigénio e humidade suficiente, ocorre a corrosão da armadura, onde posteriormente surgem fissuras (Figura 2.8).

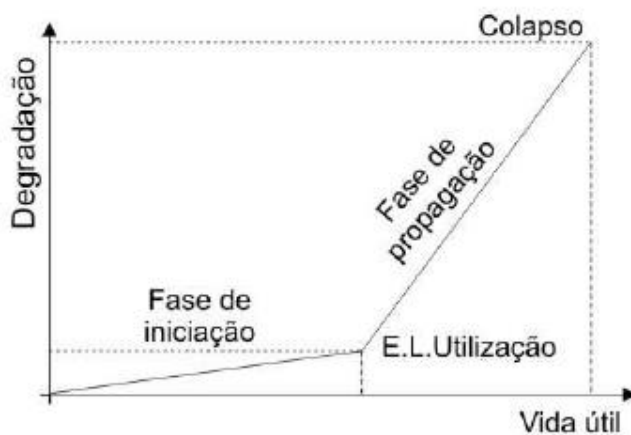


Figura 2.8 - Esquema do mecanismo de degradação para a corrosão [2].

Por ultimo, Santos (2014) [23], fornece-nos uma definição que abrange todas as referidas anteriormente como uma interação físico-química irreversível entre um metal e o meio

envolvente, provocando transformações nas propriedades do metal e deterioração do mesmo, com a corrosão química e a corrosão eletroquímica como as duas formas ocorrentes.

b) Classificações

Genericamente, a corrosão nos metais pode ocorrer de duas formas, classificadas de corrosão química e corrosão eletroquímica.

A primeira também designada de oxidação ou corrosão seca, processa-se por uma reação gás-metal, formando uma película de óxido. Este tipo de corrosão ocorre de uma forma extremamente lenta, à temperatura ambiente, não provocando deterioração substancial das superfícies metálicas, exceto se for provocado por gases muito agressivos [23].

Cascudo (1997) [22] afirma que “alguns autores declaram que a corrosão química também é eletroquímica, embora em menor escala por apresentar menor quantidade de eletrólito, e não concordam, portanto com o termo corrosão seca, bem como diferenciam corrosão química de oxidação”.

Para Helene, 1986 *apud* Monteiro (2010) [10], este fenômeno ocorre principalmente, durante o fabrico dos varões. Sucede-se a formação sobre a superfície de uma película compacta, pouco permeável e uniforme, onde pode mesmo servir de proteção relativa contra a corrosão de natureza eletroquímica.

Já a corrosão eletroquímica, é caracterizada por um ataque de natureza eletroquímica que sucede em meio aquoso, como resultado da formação de uma pilha ou célula de corrosão, sendo o primordial responsável pela corrosão do aço envolvido no betão das estruturas de Engenharia Civil [10].

Uma reação eletroquímica é um procedimento químico que envolve uma interface sólida-solução que pode ser explicada como uma reação, na qual advém a transferência de cargas entre um condutor eletrónico e um condutor iónico, que envolvem reações de oxidação e redução.

Polito (2006) [9], diz-nos que é o resultado da formação de uma célula de corrosão, como eletrólito e diferença de potencial entre pontos da superfície. Na ocorrência de um destes elementos seja arredado, ou se impossibilitarmos a entrada de oxigénio o processo é paralisado.

Este fenômeno acarreta algumas consequências causadas pela natureza eletroquímica ao nível de modificações desfavoráveis como o desgaste, variações químicas ou alterações na estrutura que pode conduzir à inutilização do sistema técnico do qual são constituintes, quer a nível de desempenho, quer a nível de durabilidade [23].

c) Tipos e formas de corrosão

A corrosão eletroquímica ostenta mecanismos idênticos, com a formação de regiões anódicas e catódicas, entre as quais ocorre a circulação de elétrons e no meio a circulação de iões, embora o desgaste dos metais e os tipos de ataque se processem de formas distintas.

São várias as formas e tipos de corrosão que existem:

- Corrosão uniforme;
- Corrosão por picadas;
- Corrosão galvânica;
- Corrosão intersticial;
- Corrosão filiforme;
- Corrosão intergranular;
- Corrosão seletiva;
- Corrosão sob ações mecânicas;
- Corrosão microbiológica, etc.

No entanto, a corrosão por picadas e a corrosão uniforme são as que se tornam fundamentais como caso de estudo e conhecimento por serem as que se encontram presentes na parte experimental.

Podemos definir corrosão por picadas como a formação de perfurações de pequeno diâmetro (picadas) que se inauguram na superfície dos metais, podendo alcançar profundidades contempláveis (em certos casos a totalidade), com reduzida ou quase nula perda de espessura estrutural, sendo de árdua deteção e monitorização visual (Figura 2.9) [9].



Figura 2.9 - Corrosão por picadas [23].

Segundo Gentil (2003) *apud* Polito (2006) [9] o início da formação das picadas é lento, contudo uma vez formado, há um procedimento autocatalítico que produz condições para um contínuo crescimento. Uma das formas para certificar a extensão do processo corrosivo, prende-se com a determinação de picadas por unidade de área, diâmetro e profundidade.

Este tipo de corrosão será muito mais intensa e perigosa quanto maior for a relação área catódica/área anódica. Em grande parte das situações, ao contrário de pontos de pequeno diâmetro e profundidade, podem surgir picadas mais rasas, mas com maior diâmetro, designadas de “crateras” (Figura 2.10) [22].



Figura 2.10 - "Crateras" [9].

O sentido destas picadas tem uma direção praticamente vertical e sentido para baixo devido à força da gravidade [9].

Segundo Santos (2014) [23], para a prevenção deste tipo de ataque, na fase de elaboração de um projeto deverão ser selecionados materiais que não sofram este tipo de corrosão, bem como ter em conta fatores como o pH, a temperatura e a concentração dos iões agressivos. No entanto, para Polito, (2006) [9], as medidas mais eficazes prendem-se na utilização de ligas mais resistentes de aços inoxidáveis ou através da proteção catódica.

A corrosão uniforme, também designada de generalizada, surge em toda a extensão da superfície, levando a uma perda uniforme de espessura [9]. Silva (2006) [24], define como o efeito de uma perda generalizada da película passiva, que resulta do processo de carbonatação do betão, ou da presença exagerada de iões cloreto (Figura 2.11).



Figura 2.11 - Exemplo de corrosão uniforme [24].

Num determinado elemento de área, a perda de massa é maioritariamente constante com diminuição da secção transversal, perante algumas heterogeneidades, podendo ter como consequências a perda de brilho e o aparecimento de rugosidade [23].

Neste tipo de corrosão, a formação de micro células apresentam-se, normalmente, em áreas reduzidas, que ao contrário da anterior, ocorre a uma velocidade mais baixa [24].

d) Fatores que induzem a corrosão (iões cloreto e carbonatação)

Como já foi supramencionado anteriormente, a corrosão é a principal causa de deterioração dos elementos de betão armado. A mesma pode ocorrer por penetração dos iões cloreto ou por carbonatação, onde irá ser mais explorada a primeira vertente, foco principal da dissertação.

Este tipo de corrosão acontece com mais frequência e intensidade em ambiente marítimo, locais estes onde existe maior presença e concentração de cloretos. Segundo Amaral (2012) [25], os cloretos podem penetrar para o interior do betão provenientes do meio ambiente, quando, por exemplo, se utilizam saís de gelo/degelo em estradas, também estas caracterizadas de corrosão por picadas.

Para Cascudo (1997) [22], os cloretos, são sem qualquer dúvida, o principal causador de corrosão do aço nas estruturas de betão, na medida em que além de sucederem em grande velocidade, causam perdas intensificadas da secção das armaduras.

Este tipo de corrosão é mais gravoso do que o devido à carbonatação, pois a velocidade de corrosão varia entre 50 a 500 $\mu\text{m}/\text{ano}$, o que suporta perdas significativas da secção, devido à desproporção entre o cátodo e o ânodo, enquanto a carbonatação origina velocidades de corrosão na ordem de 20 a 50 $\mu\text{m}/\text{ano}$ [25].

Assim, de modo a que o processo corrosivo aconteça é indispensável que haja rotura da película passivante do óxido de ferro que circunda as armaduras, que as duas zonas permaneçam ligadas eletricamente e deverá existir um teor de humidade apropriado e acesso de oxigénio à zona catódica (Figura 2.12) [26].

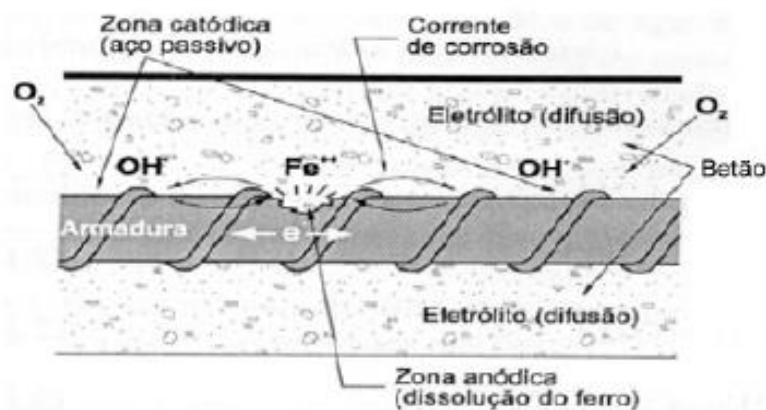


Figura 2.12 - Elementos do mecanismo de corrosão [26].

Apesar de não ser foco principal da dissertação, a corrosão induzida por carbonatação também se encontra presente no meu estudo, sendo fundamental mencionar alguns aspetos.

A corrosão por carbonatação define-se como um fenómeno físico-químico que decorre sempre que se encontre disponível no meio dióxido de carbono (CO_2) e água. O CO_2 insere-se

na rede de poros do betão, reage com o hidróxido de cálcio e forma carbonatos cálcicos, levando a uma redução do pH da solução aquosa para valores inferiores a 9. Esta penetração de dióxido de carbono ocorre por um processo de difusão em meio gasoso [25].

Através da Figura 2.13 é possível verificar visualmente a principal diferença destes dois tipos de corrosão referidas anteriormente, onde a corrosão por carbonatação encontra-se mais generalizada na armadura, enquanto que a corrosão por cloretos é mais localizada.

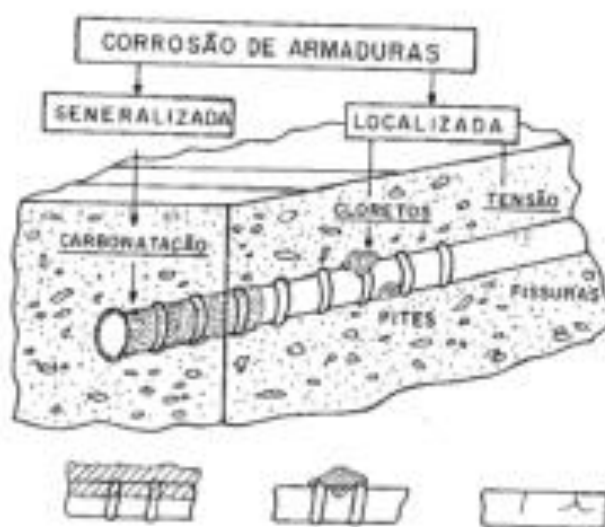


Figura 2.13 - Tipos de corrosão da armadura [25].

2.2 Penetração de cloretos no betão

O betão é um material poroso, ou seja, permeável que se deixa atravessar por gases e líquidos, que podem conter substâncias prejudiciais para a sua durabilidade. Para os agentes agressivos penetrarem para o interior do betão, estes recorrem à rede de poros contínuos, às fissuras e às microfendas existentes, onde os principais fluidos que podem penetrar e afetar a durabilidade do betão são a água pura ou com substâncias agressivas, dióxido de carbono e oxigénio [5].

Os iões cloreto inserem-se no betão através de diversas fontes, onde é de elevada relevância retratar, segundo Helene (1993) *apud* Monteiro (2010) [10], o uso de aceleradores de presa que contêm cloreto de cálcio (CaCl_2), a contaminação dos materiais constituintes do betão (água e agregados), contaminação pela névoa salina (maresia), contacto direto com a água do mar (estruturas marítimas) e através de determinados processos industriais.

Dependendo das condições de exposição, teor de humidade do betão, da dimensão e continuidade da estrutura porosa, a penetração de iões cloreto no betão pode ocorrer por quatro principais mecanismos de transporte: Permeação, absorção capilar, difusão e migração (Figura 2.14) [25].

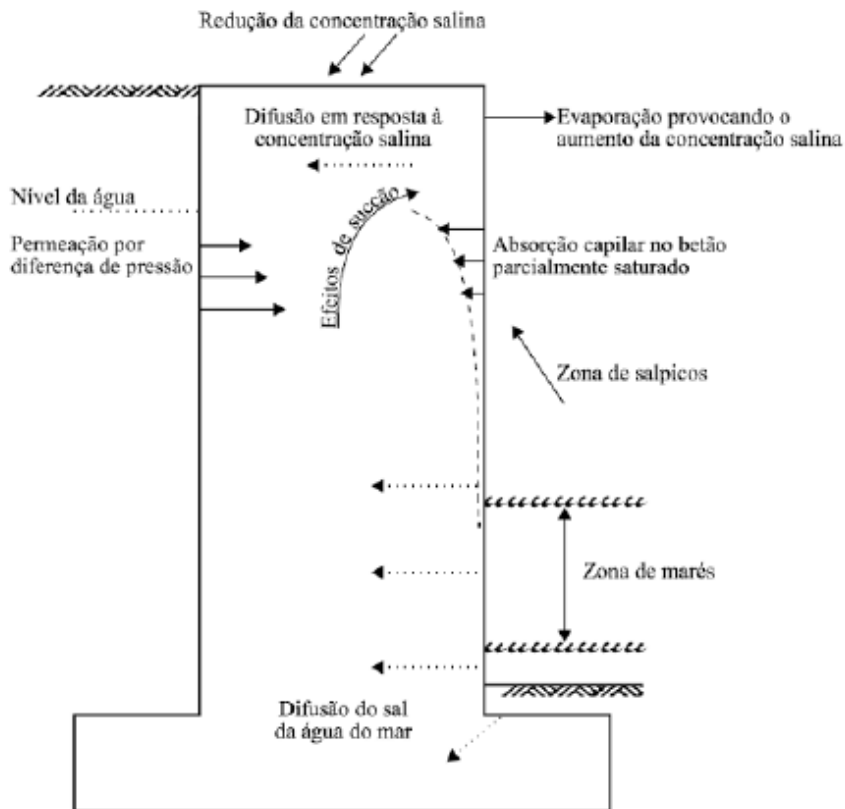


Figura 2.14 - Mecanismos de transporte numa estrutura de betão em ambiente marítimo [7].

2.2.1 Permeação/Permeabilidade

Permeabilidade corresponde ao escoamento de um fluido, em condições de saturação, através de um meio poroso por gradiente de pressão, ou por gradiente hidráulico, caso o betão esteja submerso [27].

Segundo Silva (2014) [5], este é um fenómeno no qual um fluido, gás ou líquido se irá deslocar na rede de poros e fendas existentes no betão, devido à existência de um gradiente de pressão. O autor diz-nos que o movimento do fluido no interior do betão é condicionado pela sua viscosidade, do atrito, interações físicas-químicas entre o fluido e os minerais da pasta de cimento e da dimensão dos poros e fissuras.

A Figura 2.15 é ilustrativa de um esquema de distribuição de poros de uma estrutura de betão, onde os diversos tamanhos influenciam de algum modo a velocidade do transporte dos agentes agressores.

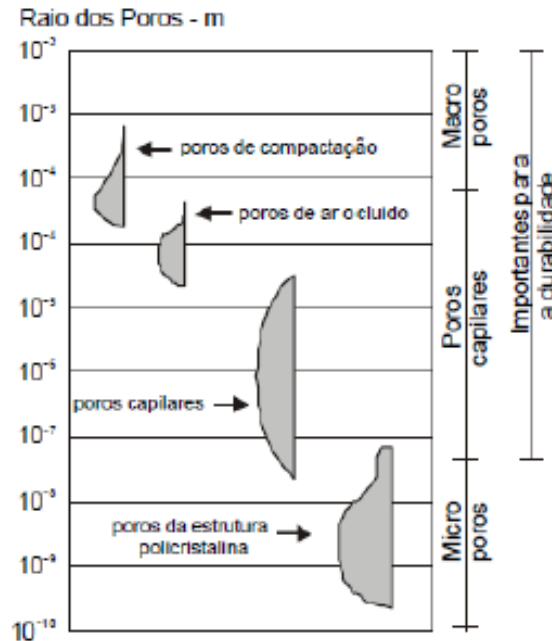


Figura 2.15 - Distribuição de poros de uma estrutura de betão [28].

A água é o principal fluido que se desloca por permeação e a sua movimentação no interior do betão é significativa para a sua durabilidade. A permeabilidade à água é uma propriedade que nos informa acerca da qualidade do betão, isto é, da estrutura porosa, que nos permite avaliar a capacidade impermeabilizante do betão (capacidade resistente à entrada de substâncias agressivas) [5].

Permeabilidade e porosidade estão diretamente relacionadas, identificando a pasta de cimento como o componente mais suscetível ao ataque. Caso esta seja densa, o ataque é circunscrito à superfície de betão, avançando de forma lenta para o seu interior. No entanto, no caso da pasta ser porosa, a penetração encontra-se facilitada à penetração dos agentes agressivos, levando a um ataque mais violento (Figura 2.16) [28].

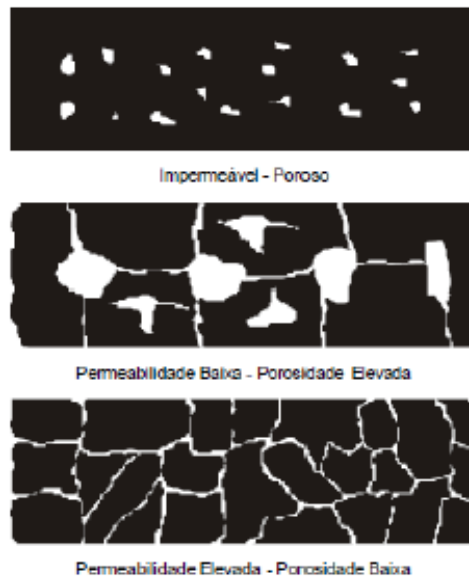


Figura 2.16 - Diferença entre permeabilidade e porosidade [28].

Como referi anteriormente, estando a permeabilidade associada à porosidade Figura 2.17, e devido ao facto desta em muito depender da razão A/C e do grau de hidratação, a permeabilidade irá portanto depender daqueles fatores, representado na Figura 2.18. Observa-se na mesma que para valores inferiores a 0,6 a permeabilidade adquire valores mais baixos, pois existe uma maior segmentação e descontinuidade dos poros capilares.

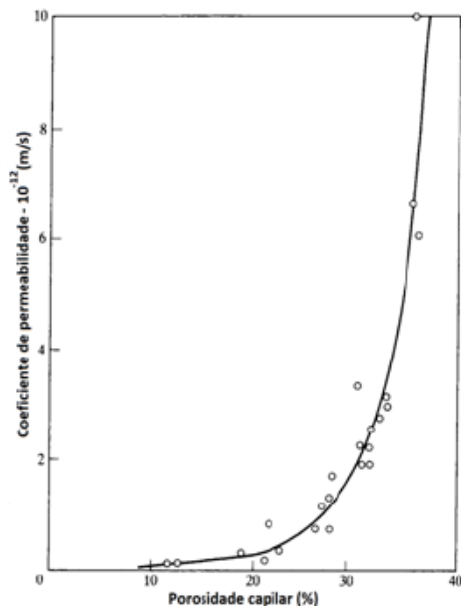


Figura 2.17 - Relação entre a porosidade capilar numa pasta de cimento e o coeficiente de permeabilidade [5].

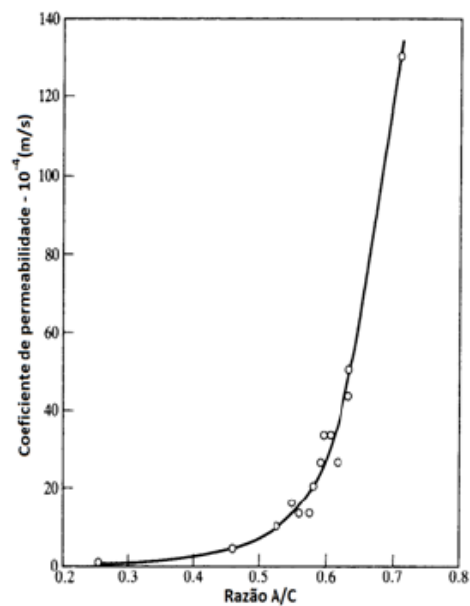


Figura 2.18 - Relação entre a razão A/C e o coeficiente de permeabilidade [5].

A pasta de cimento depende da evolução da hidratação da pasta de cimento, sucedendo que à medida que este processo se desenvolve, a permeabilidade começa a diminuir, explicado na Figura 2.19, onde o volume ocupado pelos produtos de hidratação é superior ao das partículas anidras.

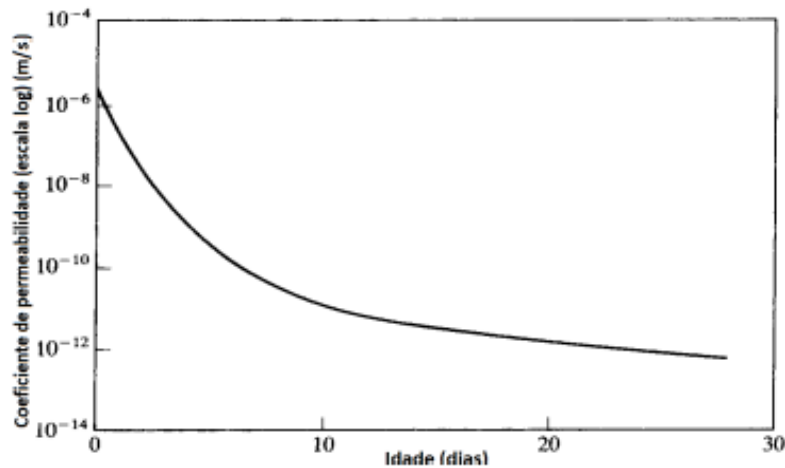


Figura 2.19 - Redução da permeabilidade da pasta de cimento com o aumento do tempo [5].

Este fenómeno é determinado pela lei de Darcy, caso o escoamento seja laminar, não turbulento e permanente (deduzida para um maciço incoerente por Darcy) (1).

$$V = ki \quad (1)$$

V - Velocidade da circulação da água (m/s);

$i = \frac{H}{L}$ - Gradiente de pressão hidráulica (adimensional);

k - Coeficiente de permeabilidade à água (m/s).

Segundo Khatri e Sirivavtananon, (1997) *apud* Coutinho (1995) [29], para determinar o coeficiente de permeabilidade à água é necessário que o betão se encontre saturado, de modo a evitar o mecanismo de absorção por capilaridade e fenómenos de fricção para que seja possível atingir um fluxo estacionário, o que não é muitas vezes possível em betões menos permeáveis.

Podemos determinar a permeabilidade à água através de duas categorias, sendo elas o método de escoamento de água sobre pressão e através do método de profundidade de penetração [29].

O primeiro compreende em submeter a determinado gradiente hidráulico, um provete de preferência de pequena espessura para que o fluxo se dê em condições estacionárias.

Para a aplicação destes métodos de escoamento de água podemos utilizar diversos tipos de equipamento como o representado na Figura 2.20 [29].

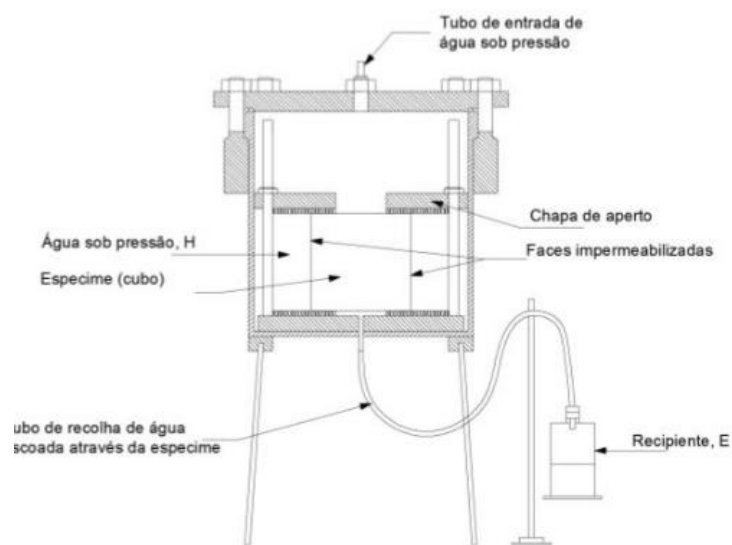


Figura 2.20 - Equipamento utilizado no LNEC para o ensaio de permeabilidade à água [29].

Já o segundo é utilizado para betões pouco permeáveis onde não é estabelecido um estado estacionário pois o fluxo não chega a atravessar o provete, em que é medida a quantidade de água penetrada ou a profundidade atingida.

Estes ensaios variam segundo inúmeros fatores como as dimensões, acondicionamento do provete e reações químicas da água com o cimento não hidratado.

Um exemplo de um equipamento que nos permite determinar este ensaio é o representado na Figura 2.21 [29].

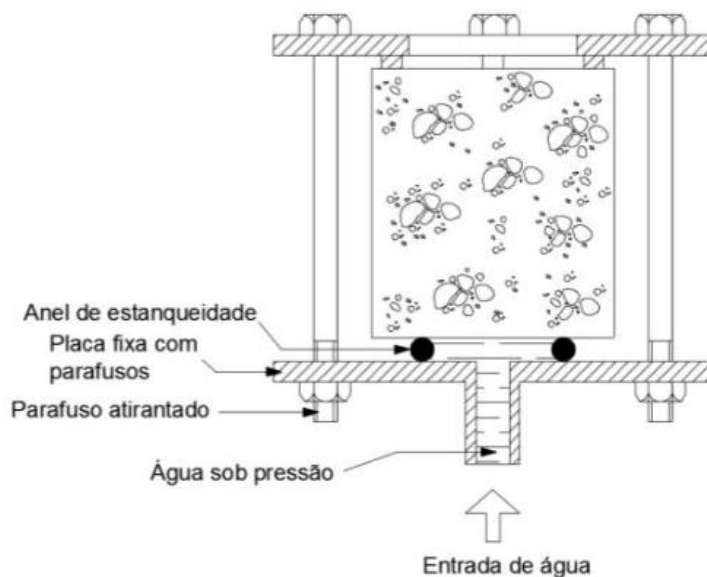


Figura 2.21 - Equipamento para determinação da profundidade de penetração de água sob pressão [29].

Os betões podem ser classificados em função dos respetivos valores do coeficiente de permeabilidade de acordo com os intervalos apresentados na Tabela 2.1, contido no comité euro-internacional de betão (CEB) [30]:

Tabela 2.1 - Classificação do coeficiente de permeabilidade em função da qualidade do betão.

Qualidade do betão	Permeabilidade	Coefficiente de permeabilidade k (m/s)
Elevada	Baixa	$<10^{-12}$
Média	Média	10^{-12} a 10^{-10}
Baixa	Alta	$>10^{-10}$

2.2.2 Absorção capilar

Este fenómeno consiste no transporte de iões para o interior do betão, especialmente em casos de betões submetidos a ciclos de molhagem e secagem, devido a forças capilares que advêm da diferença de pressão entre a superfície livre da água no exterior do betão e a superfície dos poros capilares. Este mecanismo depende da porosidade aberta, ou seja, dos poros capilares unidos entre si admitindo o transporte de substâncias líquidas contaminadas para o interior da estrutura. A humidade do betão tem uma grande influência na absorção capilar, na medida em que caso os poros se encontrem saturados, o fenómeno não se realiza, dado que não se fortalecem forças de sucção capilar [31].

Segundo Ferreira (2000) [28], a força capilar local é inversamente proporcional ao diâmetro dos poros, com os poros menores a praticar uma maior força capilar, apesar da velocidade de ingressão nos poros menores ser menor à dos poros superiores.

Como prova de exemplo, Camões (2002) [16], através dos resultados obtidos de ensaios de absorção capilar onde apenas uma face do provete anteriormente seco é imerso em água e é avaliado o aumento de peso em função da raiz do tempo decorrido a partir do início do ensaio, como é demonstrado na Figura 2.22.

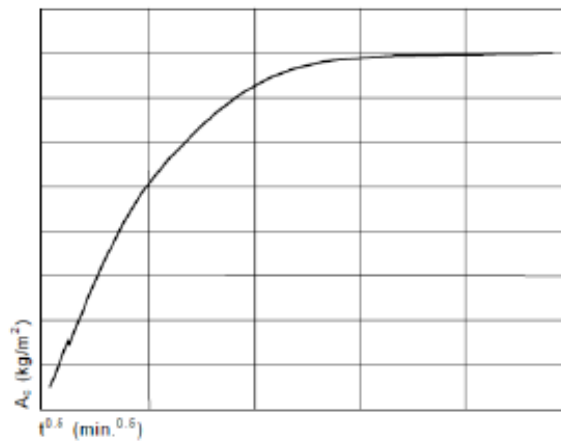


Figura 2.22 - Curva de absorção de água por capilaridade [16].

Pela análise do gráfico, podem-se analisar três diferentes momentos na curva que se dividem numa primeira fase de maior inclinação, uma segunda fase de ocupação dos capilares mais finos que se processam mais lentamente e uma terceira e última fase que se caracteriza por um estabilização de água absorvida.

Contudo, na primeira fase é importante destacar que esta maior inclinação nos permite calcular o fator S, coeficiente de absorção, que corresponde ao gradiente da curva de absorção nas primeiras 4 horas de ensaio, onde estas traduzem o período de absorção capilar dos poros de maior diâmetro (2) [7]:

$$A = a_0 + St^{0.5} \quad (2)$$

Onde,

a_0 - Água absorvida inicialmente pelos poros na superfície de contacto (mg/mm^2);

S - Coeficiente de absorção em $\text{mm}^2/\text{min}^{0.5}$;

A - Quantidade de água absorvida por unidade de área de secção em contacto com água, desde o início do ensaio (mg/mm^2).

A classificação da qualidade do betão de acordo com a especificação do LNEC E393:1993 [32] (determinação da absorção de água por capilaridade) está presente na Tabela 2.2:

Tabela 2.2 - Classificação da qualidade do betão de acordo com o coeficiente de absorção obtido através da especificação do LNEC E393:1993 [32].

Qualidade do betão	Coeficiente de absorção, S [$\text{mm}/\text{min}^{0.5}$]	Ascensão capilar após 4 horas, h [mm]
Elevada	<0,1	<10
Média	0,1 – 0,2	10 - 20
Baixa	>0,2	>20

2.2.3 Difusão

Difusão caracteriza-se por um processo que consiste no transporte de líquidos, gases ou iões que resulta de um gradiente de concentração. Contrariamente ao que ocorre nos mecanismos anteriores, esta não depende do fluxo de água para a penetração de cloretos, mas antes da diferença de concentração do agente difusor que existe entre o meio envolvente e o betão, na carência de pressão hidráulica. Mais concretamente, o transporte ocorre de uma zona mais concentrada para uma menos concentrada, pois tende a equilibrar as concentrações no interior do betão [1].

Segundo Silva (2014) [5], o grau de saturação de água nos poros capilares tem extrema importância no processo de difusão, onde no caso dos gases, dióxido de carbono e oxigénio, o processo de difusão vai encurtando à medida que os poros vão ficando saturados pela água. Como demonstra a Figura 2.23, este processo torna-se praticamente desprezável quando o betão fica totalmente saturado, na medida em que a difusão do dióxido de carbono na água é quatro vezes mais lento do que feito através do ar. Com a ausência de humidade relativa o coeficiente de difusão é maior, no entanto é necessário uma quantidade mínima de água no interior para que as reações químicas se desenvolvam no interior do betão.

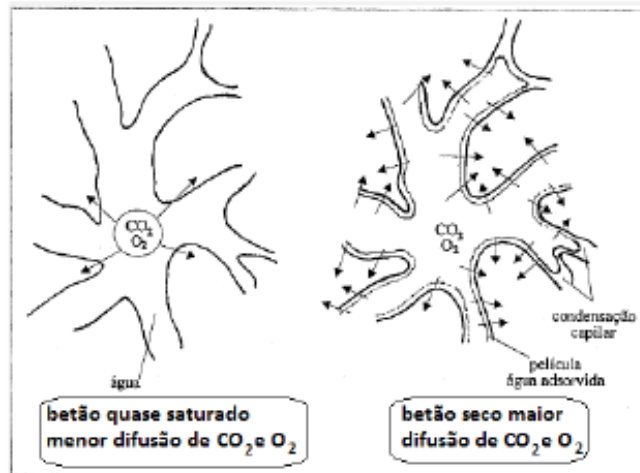


Figura 2.23 - Difusão de oxigénio e dióxido de carbono para condições diferentes de humidade relativa [5].

O processo de difusão de uma substância é análogo ao processo de condução de calor. Em 1855, Fick *apud* Pereira (2001) [21] constatou que conseguia quantificar a difusão adotando a equação matemática da condução do calor antecipadamente explicada por Fourier (1822).

Para a previsão do ingresso de cloretos no betão, temos inúmeros modelos que, segundo Nugue *et al.* (2004) [33], baseiam-se nas leis de Fick. A primeira Lei de Fick é baseada na hipótese de que a velocidade de transferência da substância difundida através da unidade de área de uma secção, é proporcional ao gradiente de concentração medido regularmente a essa secção, relacionando o fluxo difusivo, e unidimensional, com o gradiente de concentração da espécie em estudo (3).

$$J = -D \frac{\delta c}{\delta x} \quad (3)$$

J - Fluxo de massa;

D – Coeficiente de difusão;

$\frac{\delta c}{\delta x}$ – Gradiente de concentração.

Em certos casos, D pode ser tomado como constante (ex: difusão de substâncias dissolvidas) e noutros casos, D depende e varia com a concentração. O sinal negativo na expressão indica

que a difusão se dá no sentido contrário ao aumento da concentração, ou seja, o fluxo ocorre do sentido da maior concentração para a menor.

A segunda Lei de Fick é aplicada para o caso do fluxo não estacionário, isto é, aquele em que a concentração varia com o tempo, onde a equação diferencial é obtida a partir da 1ª Lei de Fick, considerando um elemento de volume paralelepípedo em que a difusão acontece segundo uma direção normal (x) a uma das faces desse elemento [34] (4).

$$\frac{\delta c}{\delta x} = D \frac{\delta^2 c}{\delta x^2} \quad (4)$$

Segundo Medeiros (2008) [35], o valor de D , coeficiente de difusão de cloretos, pode ser obtido através do estado de difusão estacionário, que não tem influência na fixação de cloretos, e por outro método que se baseia em ensaios em regime não estacionário, onde a fixação de cloretos influencia o coeficiente de difusão.

Na determinação de D , para o segundo caso, o provete é ensaiado segundo uma imersão numa solução que contém NaCl, podendo também ter cal, onde apenas uma das faces fica sujeita à penetração unidirecional dos iões cloreto. É de extrema importância garantir que o provete imerso, se encontre saturado, de forma garantir que a penetração é feita apenas pela difusão e não por outro qualquer mecanismo de transporte. Com base na 2ª Lei de Fick (3), e através do traçado do perfil de cloretos, podemos obter a relação entre o teor de uma espécie não reativa num meio semi-infinito, com variação do teor de cloretos às várias profundidades (Cx) e profundidade x (5).

$$Cx = Cs - (Cs - Co) \operatorname{erf} \frac{1/2x}{\sqrt{Dap \cdot Dt}} \quad (5)$$

Caracterizando Cx como o teor de cloretos medido à profundidade x para um tempo de imersão t , Cs para um teor de cloretos à superfície do betão após um tempo de imersão t , Co o teor inicial de cloretos no betão, x a profundidade, Dap o coeficiente de difusão aparente e erf a função erro.

2.2.4 Migração

Segundo Coito (2008) [27], migração define-se como a movimentação de íons que ocorre através da corrente gerada pela ação dos campos elétricos procedentes da corrente elétrica do processo eletroquímico. Estes campos elétricos podem ser provenientes de uma diferença de potencial oriunda de uma fonte externa ou da deflagração de pilhas de corrosão eletroquímicas [6]. Este acontecimento é algo invulgar e pode ser observado, por exemplo, em trabalhos de extração de cloretos por dessalinização.

Este mecanismo de avaliação da resistência da penetração de cloretos no betão é regularmente utilizado em ensaios acelerados [36], onde “ASTM C1202-07 – Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration” é o mais citado, apesar das elevadas críticas que se prendem a três principais erros: a variável medida é a corrente total e não a parte que corresponde especificamente ao fluxo de cloretos; a alta diferença de potencial (60V) estimula o aquecimento que acaba afetando a velocidade do fluxo dos íons; por último a inclusão da corrente ao longo do tempo não diferencia, no início do ensaio, o que se refere ao fluxo de cloretos e o que se refere à reação de fixação dos mesmos [37]. Na Figura 2.24 é possível observar este ensaio, onde as amostras, instaladas em meia-célula, contêm uma face em contacto com uma solução de NaOH e outra em contacto com uma solução de NaCl, submetidas a uma diferença de potencial de 60V, durante um intervalo de 6 horas, com uma corrente passante de 30 minutos que é monitorizada.

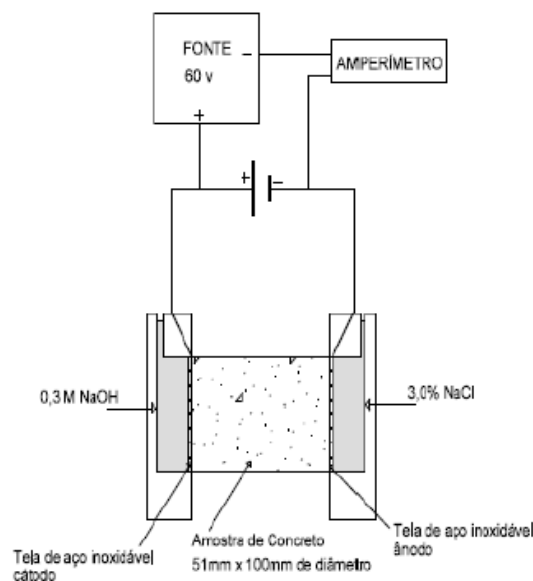


Figura 2.24 - Esquema do teste de migração de cloretos AASHTO T277 [38].

Se for desprezada a influência da convecção e, simultaneamente não for considerada a ação da difusão, que se prende ao elevado valor de voltagem aplicada, considerando a penetração dos iões de cloro sob potenciais químicos e elétricos como unidirecional e adotando que o fluxo de iões que percorre o material é resultado da soma dos dois processos, chegamos à equação (6) para caracterizar o fenómeno [39].

$$J = -D_{ns} \left(\frac{\partial y}{\partial x} - \frac{ZF\Delta E}{RTL} C \right) \quad (6)$$

J - Fluxo de massa de espécies difundidas;

D_{ns} - Coeficiente de difusão por migração em regime não estacionário;

$\frac{\partial y}{\partial x}$ - Gradiente de concentração para o interior do betão, onde y apresenta a concentração e x a distância da superfície;

Z - Carga do ião cloreto;

F - Constante de Faraday;

ΔE - Diferença de potencial instalada;

R - Constante dos gases perfeitos (=8,314 J/ (mol.k));

T - Temperatura absoluta;

L - Espessura do provete de betão.

Segundo Ferreira (2000) [28], se for desprezada a influência da convecção e, em simultâneo a ação da difusão, devido ao elevado valor de voltagem aplicada, temos na equação (7), como proceder ao cálculo do coeficiente de difusão:

$$D_{ns} = D \frac{JRTL}{ZF\gamma\Delta E} \quad (7)$$

γ - Coeficiente de atividade.

Segundo Camacho (2015) [1], o esquema desenvolvido para a determinação do coeficiente de difusão de cloretos em regime não estacionário, baseado no método CTH, tem marcado presença em alguns documentos ao nível Europeu, como o NT BUILD 492 (1999) [40] e LNEC E 463 (2004) [41], como demonstrado na Figura 2.25:

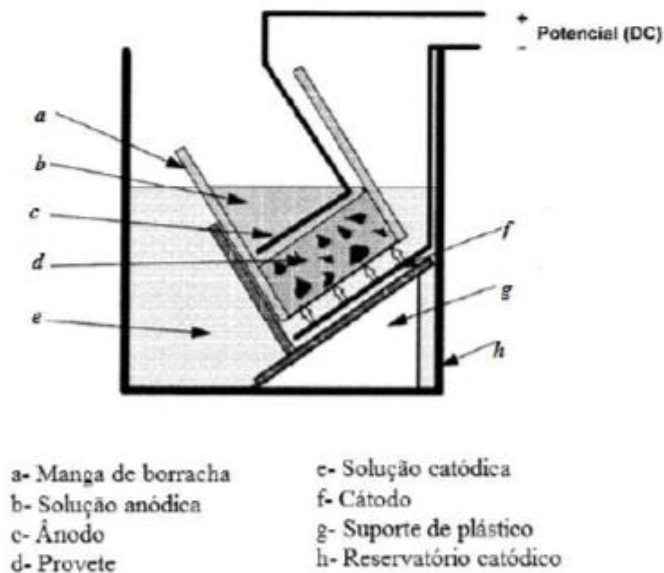


Figura 2.25 - Esquema de ensaio de migração de cloretos em regime não estacionário [41].

Tal como foi realizado nos anteriores mecanismos, os resultados de ensaios de migração também podem ser agrupados em classes de resistência à penetração de cloretos, realizados de acordo com o método CTH (Tabela 2.3):

Tabela 2.3 - Classes de resistência do betão à penetração de cloretos [16].

Coefficiente de difusão em estado não estacionário, D_{ns}	Classe de resistência à penetração de cloretos
$D_{ns} \geq 15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Reduzida
$10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} < D_{ns} < 15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Moderada
$5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} < D_{ns} < 10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Elevada
$2,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} < D_{ns} < 5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Muito elevada
$D_{ns} \leq 2,5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Ultra elevada

2.3 Fatores que influenciam a penetração de cloretos

É de extrema relevância conhecer os fatores que influenciam o transporte de cloretos, de modo a que esse possa ser controlado através dos materiais escolhidos e das condições de exposição a que as estruturas são submetidas.

O fenómeno da penetração de cloretos pode ser influenciado por diversos fatores, como é o caso da humidade relativa, a temperatura, o tipo de sal, as condições de exposição, a concentração superficial de cloretos, a carbonatação, o tipo de cimento, o tempo de cura, as condições de cura, a presença de fissuras, a resistividade elétrica e a relação água/cimento.

Posteriormente irão ser discutidos alguns destes fatores, para uma melhor compreensão.

2.3.1 Relação água/cimento

Segundo Meira (2004) [42], a relação água/cimento está diretamente ligada à porosidade do betão, e deste modo, pode gerar um betão mais ou menos denso. Por consequente, alterar esta relação pode facilitar, se houver um aumento da relação, ou dificultar, caso ocorra uma diminuição desta relação.

Estudos como Conciatori *et al.* (2009) [43] e Balouch *et al.* (2010) [44], onde se fazem variar a razão a/l de modo a estudar de que forma esta pode comprometer a penetração de cloretos no betão, observa-se que quanto menos porosa é a argamassa, menor é a concentração de cloretos, onde esta relação está intimamente ligada à redução de porosidade das argamassas mais ricas e a sua maior quantidade de C₃A.

Bioubakhsh (2011) [45], mostra-nos que a difusão de cloretos não é afetada de forma significativa pela composição do cimento, mas antes pela razão água/cimento. Este estudo pode ser observado na Tabela 2.4, onde existe um aumento da difusão de iões cloreto que resulta do aumento da razão a/l.

Tabela 2.4 - Coeficientes de difusão de cloretos para diferentes composições de betão [45].

Classe do betão	C ₃ A	Al ₂ O ₃	C ₄ AF	$D_c \times 10^{-12}$ com razão a/l de:			
				0,4	0,5	0,6	0,7
PC35	<1%	<3%	-	6,0	7,0	10,0	19,0
PC45	<1%	<3%	-	2,9	3,0	5,0	11,0
PC55	<1%	<3%	-	1,7	2,1	3,2	6,5
PC35	≈10%	-	≈7%	0,2	0,5	1,1	3,0
PC45	≈10%	-	≈7%	0,09	0,25	0,50	1,5
PC55	≈10%	-	≈7%	0,05	0,07	0,11	0,21

Outro estudo que demonstra este facto, em ambiente laboratorial, é realizado por Page *et al.* (1981) [46], onde são demonstrados valores de coeficientes de difusão extremamente altos

quando existe uma relação água/cimento em pastas de cimento utilizando cimento Portland comum, demonstrado na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Coeficiente de difusão em função da relação a/l e da temperatura [46].

Temperatura °C	Relação a/l		
	0,4	0,5	0,6
	Coeficiente de Difusão ($\times 10^{-9} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$)		
7	11,03	20,7	51,9
14,5	12,7	23,6	84,6
25	26	44,7	123,5
35	44,7	94,8	165,2
44	84	183,6	318,2

Santos (2014) [23], procedeu ao estudo de vários cenários de razão a/l, onde concluiu que à medida que se diminui a razão a/l, sucedem-se efeitos benéficos em determinadas propriedades da matriz cimentícia, que se traduzem numa menor penetração de cloretos na solução porosa do betão. Todavia, o aumento desta razão a/l potencia um maior coeficiente de difusão de cloretos, registado na Figura 2.26.

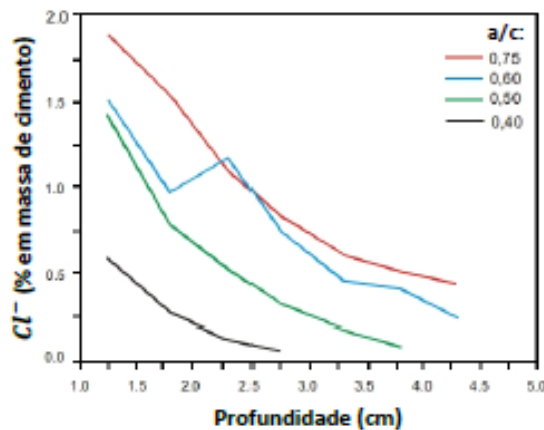


Figura 2.26 - Influência da razão a/l na penetração de cloretos [23].

2.3.2 Tempo de cura

O tempo de cura e as condições em que é realizada são fatores fundamentais e determinantes na difusão de cloretos. Betões curados ao ar livre e curados em água apresentam respetivamente, maior e menor condutividade de cloretos, onde para que se consigam alcançar

baixos níveis de condutividade de cloretos é fulcral que a cura do betão seja em ambiente húmido [45].

Lage (2013) [47], define período de cura como o processo que permite impossibilitar a saída de água do betão e detém um efeito essencial no grau de hidratação das partículas superficiais da mistura cimentícia, que significa uma influência nos mecanismos de transporte, na estrutura porosa do betão e conseqüentemente na difusão dos cloretos para o seu interior.

Através da Figura 2.27 é possível reparar numa correspondência entre períodos de cura e profundidades de penetração de cloretos:

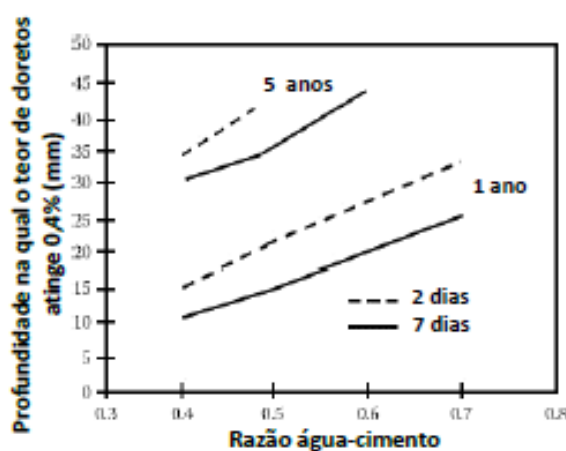


Figura 2.27 - Influência do período de cura na difusibilidade de iões cloreto [23].

Segundo Mehta e Monteiro (1994) *apud* Malheiro (2008) [6], o tempo de cura tem uma elevada influência na penetração de cloretos, onde durante este período diversas reações químicas relativas à sua hidratação vão se sucedendo, adquirindo maior importância nas primeiras idades, estando diretamente relacionadas com a formação da estrutura porosa do betão.

Conclui-se portanto, que o transporte de cloretos é inversamente proporcional ao tempo de cura, pois com o alargamento do tempo de cura, a porosidade fica mais refinada e os poros diminuem, sendo que essa diminuição aumenta a dificuldade da penetração de cloretos através do seu mecanismo mais relevante, ou seja, a difusão [6].

2.3.3 Quantidade de C₃A no cimento

A quantidade de C₃A existente no cimento adquire um papel importante e favorecedor na fixação dos íons cloreto, onde esta está diretamente relacionada com a quantidade deste composto presente na solução [6].

O acréscimo da dosagem de ligante facilita a ligação química de cloretos com os seus constituintes, o que reflete uma diminuição da porosidade e conseqüentemente num menor coeficiente de difusão, demonstrado na Figura 2.28.

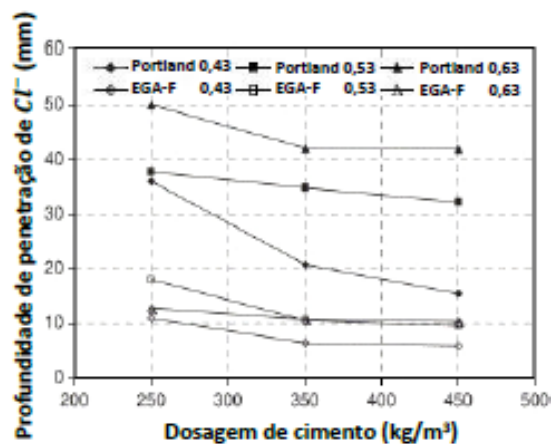


Figura 2.28 - Influência da variação da dosagem de cimento e razão a/l na penetração de cloretos.

Rasheeduzzafar *et al.* (1990) [48] fez variar os teores de C₃A, onde concluiu que cimentos com maiores teores de C₃A podem ter um desempenho superior aqueles com baixos teores de C₃A, como demonstrado na Tabela 2.6:

Tabela 2.6 - Acréscimo de tempo para iniciar a corrosão em função do teor de C₃A [48].

Teor de C ₃ A (%)	% de cloretos livres	Acréscimo de tempo para iniciar a corrosão
2	86	Referência
9	58	1,75 vezes
11	51	1,93 vezes
14	33	2,45 vezes

Estudos como de Oh e Jang (2007) [49], que fizeram variar a percentagem de C₃A, ou seja, um cimento Portland comum (não existe imposição sobre o limite de C₃A) e cimento Portland resistente com um limite de 5% de C₃A. Findado o estudo, estes concluíram que o coeficiente de difusão das amostras com cimento comum, com maior teor de C₃A, são inferiores aos obtidos com as amostras que têm menor valor de C₃A.

2.3.4 Temperatura

Bioubakhsh (2011) [45], diz-nos que a temperatura tem um efeito complexo na difusão de cloretos, onde o seu aumento conduz a um incremento na difusão de iões cloreto. No entanto, também faz com que melhore a capacidade de ligação entre os iões, que para além disso, a hidratação do betão e as reações pozolânicas são aceleradas na presença de elevadas temperaturas, tornando assim a estrutura porosa do betão mais densa.

Em grande parte dos processos de natureza química, a temperatura atua aumentando a cinética das reações, acontecimento este que pode explicar a maior quantidade de estruturas deterioradas em regiões com temperaturas elevadas em detrimento das que se situam num clima mais frio [50].

Diversos estudos foram realizados como é o caso de Lindvall (2007) [51], que estudou de que forma a variação da temperatura influencia o transporte de cloretos em amostras que se encontram expostas a condições de laboratório e condições naturais. Concluiu que a temperatura adquire maior influência quando as amostras são expostas a condições naturais do que quando ensaiadas em laboratório, conclusão esta que poderá estar relacionada com as diferenças de pH da água.

Também Jensen *et al.* (1999) [52], estudou a influência da temperatura, mas neste caso em amostras de cimento e argamassas concluindo que o aumento da temperatura acelera a penetração de cloretos. Segundo estudou Page *et al.* (1981) [46], que também procedeu ao estudo das pastas de cimento com distintas temperaturas, averiguou aumentos consideráveis no coeficiente de difusão, consoante se variavam os valores de temperatura, verificado na Tabela 2.5.

2.3.5 Humidade relativa

A humidade relativa demonstra ser um fator essencial no estudo da penetração dos iões cloreto no betão, pois este transporte depende fundamentalmente da presença de água, sendo este aumento uma forma de maior facilidade da entrada dos iões cloreto para o seu interior. Estudos como o de Saetta *et al.* (1993) *apud* Meira (2004) [42], conclui que quando decresce do valor crítico de 75%, a difusividade dos iões cloreto ostentam uma queda acentuada. Também Nielsen e Geiker (2003) [53], procederam a avaliação do coeficiente de difusão, em argamassas, em meios não saturados, onde repararam um acréscimo do coeficiente de difusão

de cerca de quatro vezes quando se fez variar uma humidade relativa de 65%, para uma situação saturada, (Tabela 2.7).

Tabela 2.7 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos em argamassas em função da variação da humidade relativa e da exposição ao NaCl [53].

Condição	Exposição	D ($\times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
65 % RH	Solução com 26,4 % NaCl por 2h	Referência
85 % RH	Solução com 26,4 % NaCl por 2h	1,75 vezes
Saturação a vácuo	Imersão em solução com 3% de NaCl por 30 dias	1,93 vezes

2.3.6 Tipo de cimento

Segundo o estudo realizado por Meira (2004) [42], é importante destacar que o tipo de cimento e o seu efeito está relacionado com uma maior contribuição do clínquer e, por consequente, maior capacidade de fixação de cloretos. Conclui, também que quando os consumos de cimento aumentam, a capacidade de transporte de cloretos diminui, em função da maior capacidade de fixar cloretos por m^3 de betão.

A adição de materiais pozolânicos ou hidráulicos latentes (exemplo das cinzas volantes, sílica de fumo e escória granulada de alto-forno) têm como consequência a minoração da dimensão dos poros da pasta cimentícia, devido à formação de produtos de hidratação mais finos, melhorando a resistência do betão à penetração de cloretos. Estas adições são mais vantajosas em ambientes de elevada agressividade, especialmente porque os seus benefícios estão relacionados com a diminuição da permeabilidade da camada superficial do betão.

2.3.7 Fissuração

Segundo Bakker (1988) *apud* Camacho (2015) [1], a fissuração é inversa ao tempo de cura, onde a penetração de cloretos é diretamente proporcional a esta. As fissuras transversais compõem um itinerário acelerado de penetração dos agentes agressivos na direção das armaduras.

2.3.8 Condições de exposição

Os principais fatores que influenciam a deposição dos cloretos existentes no ar na superfície das estruturas e a posterior penetração para o interior do betão são a distância à orla costeira, a orientação do vento, a altura do elemento e a ausência de proteção à água das chuvas. A

deposição de cloretos na superfície é tão intensa, quanto maior a proximidade da orla costeira e da frequência com que os ventos sopram do mar. Os cloretos depois de depositados na superfície, penetram para o interior do betão, sob os mecanismos de difusão e absorção, auxiliados pela elevada humidade do ar [47].

A especificação LNEC E 464 [54] e NP EN 206-1 [18] classifica as estruturas em função do ambiente de exposição a que estão sujeitas, agrupando-as consoante os cloretos serem provenientes da água do mar ou de outras origens, afetando o dimensionamento das estruturas de betão armado no que respeita a durabilidade (Tabela 2.8).

Tabela 2.8 - Classes de exposição ambiental, para estruturas sujeitas a corrosão induzida por cloretos [54] e [18].

Corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar		
Classe	Designação do ambiente	Exemplos informativos
XD1	Moderadamente húmido	Betão armado em partes de pontes afastadas da ação direta dos sais descongelantes, mas expostas a cloretos transportados pelo ar.
XD2	Húmido, raramente seco	Betão armado completamente imerso em água contendo cloretos; piscinas.
XD3	Ciclicamente húmido e seco	Betão armado diretamente afetado pelos sais descongelantes ou pelos salpicos de água contendo cloretos ⁽¹⁾ . Betão armado em que uma das superfícies está imersa em água contendo cloretos e a outra exposta ao ar (v.g., algumas piscinas ou parte delas). Lajes de parques de estacionamento de automóveis ⁽²⁾ e outros pavimentos expostos a sais contendo cloretos.
⁽¹⁾ No nosso país estas situações devem ser consideradas na classe XD1.		
⁽²⁾ <i>Idem</i> , se relevante.		
Corrosão induzida por cloretos da água do mar		
Classe	Designação do ambiente	Exemplos informativos
XS1	Ar transportando sais marinhos mas sem contacto direto com água do mar	Betão armado em ambiente marítimo saturado de sais. Betão armado em áreas costeiras perto do mar, diretamente exposto e a menos de 200 m do mar; esta distância pode ser aumentada até 1 km nas costas planas e foz dos rios.
XS2	Submersão permanente	Betão armado permanentemente submerso.
XS3	Zonas de marés, de rebentação e de salpicos	Betão armado sujeito às marés ou aos salpicos, desde 10 m acima do nível superior das marés (5 m na costa Sul de Portugal Continental) até 1 m abaixo do nível inferior das marés. Betão armado em que uma das superfícies está imersa em água do mar e a outra exposta ao ar (v.g., túneis submersos ou abertos em rocha de solos permeáveis no mar ou em estuário de rios). Esta exposição exigirá muito provavelmente medidas de proteção suplementares.

Na Tabela 2.9, estão demonstrados os valores mínimos de recobrimento, os limites da composição (relação a/l e dosagem de cimento) e da classe de existência do betão sob ação dos cloretos, para uma vida útil de 50 anos, segundo a especificação LNEC E 464 [54]:

Tabela 2.9 - Limites da composição e da classe de resistência do betão sob ação dos cloretos, para uma vida útil de 50 anos [54].

Tipo de cimento	CEM IV/A (Referência); CEM IV/B; CEM III/A; CEM III/B; CEM V; CEM II/B(1); CEM II/A-D			CEM I; CEM III/A(1)		
	XS1/XD1	XS2/XD2	XS3/XD3	XS1/XD1	XS2/XD2	XS3/XD3
Classe de exposição	XS1/XD1	XS2/XD2	XS3/XD3	XS1/XD1	XS2/XD2	XS3/XD3
Mínimo recobrimento nominal (mm) *	45	50	55	45	50	55
Máxima razão água/cimento	0,55	0,55	0,45	0,45	0,45	0,40
Mínima dosagem de cimento, C (kg/m ³)	320	320	340	360	360	380
Mínima classe de resistência	C30/37 LC30/33	C30/37 LC30/33	C35/45 LC35/38	C40/50 LC40/44	C40/50 LC40/44	C50/60 LC50/55
(*) Não aplicável aos cimentos II-T, II-W, II/B-L e II/B-LL.						

Costa (1997) [55] diz-nos que para as estruturas marítimas na zona de rebentação (XS3), zona de maré (XS3) e zona submersa (XS2), a penetração de cloretos acontece a uma velocidade imensamente superior, conseqüente não só da maior quantidade de cloretos em contato com a superfície do betão, como o elevado teor de humidade do betão que simplifica a circunstância da penetração por difusão.

Nas zonas onde o betão é exposto a ciclos persistentes de imersão e secagem, considera-se que o transporte de cloretos para o interior do betão acontece preferencialmente por capilaridade.

A partir de uma certa profundidade, o transporte de cloretos passa a acontecer particularmente por difusão, transporte este que dependerá de fatores como a qualidade do betão de recobrimento, entre outros [47] (Figura 2.29).

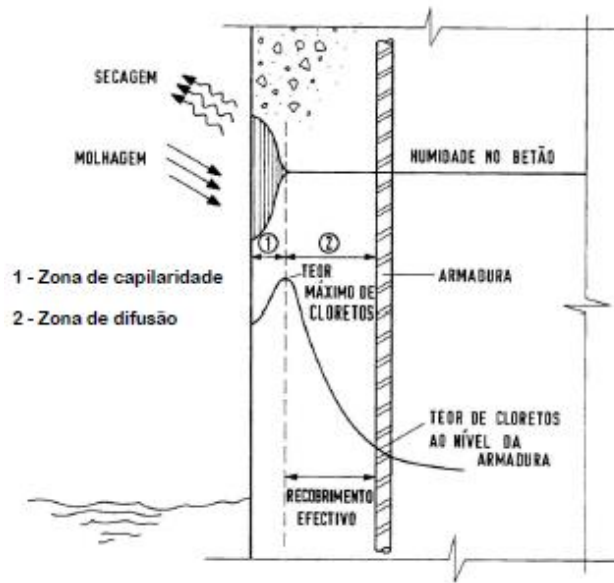


Figura 2.29 - Mecanismos de penetração de cloretos na zona atmosférica e rebentação [47].

2.3.9 Resistividade elétrica

Segundo Gonçalves (1999) *apud* Lage (2013) [47], a resistividade elétrica é um fator que permite avaliar a facilidade com que a corrente iónica circula através do betão. Tanto a qualidade do betão, particularmente a conetividade da rede de capilares, como o coeficiente de difusão, podem ser avaliadas pela resistividade.

Browne (1980) [56], concluiu que a ampliação do teor de cloretos para o mesmo teor de humidade diminui a resistividade do betão, como ilustrado na Figura 2.30.

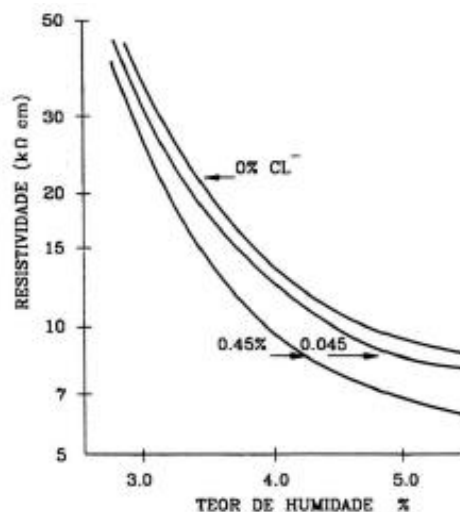


Figura 2.30 - Influência do teor de cloretos e da humidade na resistividade elétrica [56].

Para Andrade (2004) [57], a contaminação por cloretos diminui a resistividade de modo pouco expressivo, por ser pequena a influência dos íons cloreto na condutividade de soluções alcalinas, como a contida nos poros de betão.

2.3.10 Utilização de cal

A presença de cal na solução usada para a molhagem de amostras de betão, pode influenciar, ou não, a penetração de cloretos para o seu interior.

Um dos ligantes artificiais mais antigos é o ligante que resulta da cozedura dos calcários, formados sobretudo por CaCO_3 , abundantemente disponíveis na natureza. Articulada a estes existe sempre a argila, em maior ou menor quantidade, devido à precipitação do carbonato de cálcio em águas de grande tranquilidade, originando o calcário margoso. Quando a argila se encontra em quantidade superior ao carbonato forma-se uma margam calcária, permitindo dividir assim os calcários em puros ou com presença de argila [7].

A cozedura do calcário puro dá origem ao óxido de cálcio formando a cal aérea e a cozedura do calcário margoso dá origem às cals mais ou menos hidráulicas [29].

Nesta dissertação foi utilizada a cal aérea, onde após misturada em água forma a cal hidratada, ou seja, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, hidróxido de cálcio. Simplificadamente o hidróxido de cálcio surge quando o óxido de cálcio é misturado ou “extinto” com a água. Conforme a quantidade de água utilizada, o hidróxido de cálcio pode ser um hidrato seco (pó seco), uma pasta (pasta de cal) ou um leite de cal líquido [58].

A cal hidratada está presente em diversos trabalhos experimentais como o caso de Malheiro *et. al.*(2014) [59] que estudou a influência da cal no transporte de cloretos de forma indireta, através de modificações na microestrutura das argamassas, com o incremento do teor de cal em substituição ao cimento.

2.4 Ensaios utilizados para medir a penetração de cloretos

Para que seja possível medir a penetração de cloretos, podemos optar por dois tipos de ensaios, ou seja, ensaios naturais ou ensaios acelerados.

Estes diferenciam-se, sobretudo, no tempo que demoram a ser concluídos. Os ensaios naturais não têm qualquer tipo de mecanismo que acelere a penetração dos cloretos e são, portanto,

mais vagarosos. Vários autores já utilizaram este tipo de ensaio, como é o caso de Costa e Appleton (2001) [60], que procederam ao estudo no estuário do Sado, com uma concentração entre 16 e 21 g/l de NaCl. No final do ensaio as amostras foram perfuradas com dois furos retirando o pó, onde as mesmas foram de seguida analisadas e determinado o total de cloretos que penetraram no betão. Castro *et al.* (2001) [8], utilizou o ensaio natural para estudar betões expostos a diferentes microclimas e discutir o seu comportamento de acordo com parâmetros ambientais, qualidade do betão e períodos de imersão. Lindvall (2007) [51], estudou 12 locais do mundo em comparação a ensaios laboratoriais realizados em paralelo, onde foi possível concluir que a quantidade de NaCl e a temperatura da água influenciam a penetração de cloretos.

Os ensaios acelerados têm, portanto, a vantagem de serem realizados num curto espaço de tempo, onde podemos realizá-los segundo diferentes métodos.

2.4.1 Ensaio de migração

A utilização de ensaios naturais para a obtenção dos parâmetros de transporte de cloretos para o interior do betão, pode durar meses e por vezes alguns anos. Para contrariar este facto, foram desenvolvidos ensaios que aplicam campos elétricos, de forma a acelerar o transporte de cloretos para o interior do betão. Outro dos principais objetivos prende-se com a necessidade de diminuir o tempo de ensaio, pois mesmo com razões a/l relativamente elevadas, a velocidade de propagação de cloretos no betão é bastante baixa e, outros ensaios como o AASHTO T259 levavam bastante tempo a ficar concluídos [38].

Este tipo de teste é padronizado por normas como ASTM C1202/97 e AASHTO T277 [33]. Recentemente tem-se utilizado a norma do LNEC E-463 (2004) [41], onde nos define ensaio de migração como a aplicação entre os topos do provete de um potencial elétrico, onde os iões cloreto são forçados a migrar a partir de uma solução de NaCl em contacto com uma das faces do provete e sujeita a uma carga negativa, para o interior do betão até à outra face onde se encontra uma solução de NaOH carregada positivamente. Para saber o tempo e a tensão de ensaio necessário aplica-se uma corrente de 30 V e mede-se a intensidade da corrente, onde através da leitura da norma verifica-se o tempo necessário para o ensaio, que pode ser de 6 horas até 96 horas que é o tempo máximo de ensaio [7]. O esquema da realização do ensaio pode ser visto na Figura 2.31.

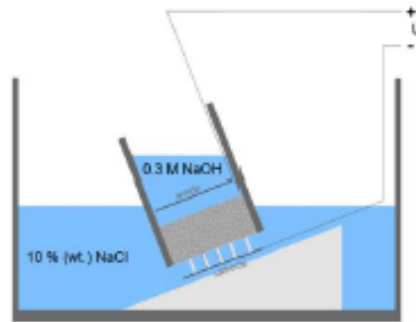


Figura 2.31 - Representação esquemática do ensaio [61].

Outros ensaios foram desenvolvidos como é o caso de ASTM C1202, ou “Rapid Chloride Permeability Test”, que tinha como objetivo o desenvolvimento de técnicas não destrutivas e “in situ” de avaliação da permeabilidade do betão aos cloretos. Neste, a amostra é sujeita a uma carga elétrica de 60 V durante 6 horas e, ao longo desse período são efetuadas leituras a cada 30 minutos.

Este ensaio, apesar de ser abundantemente utilizado para verificação da resistência à penetração de cloretos, muitos autores o questionam quanto à sua habilidade de medida da durabilidade do betão face aos iões cloretos. Problemas como a elevada temperatura causada pela diferença de potencial fez com que trabalhos como os de Castellote *et al.* (2001) [62] e Tong e Gjörv (2001) [36], adotem uma diferença de potencial muito inferior, de 12 V, de forma a que se consiga controlar a temperatura para valores mais baixos.

2.4.2 Câmara de névoa salina

O ensaio de câmara de névoa salina, também designado por “salt spray test”, é um ensaio bastante importante na área da corrosão pois consegue simular um ambiente marinho rigoroso [63]. Este ensaio foi proposto em meados da década de 1910, no entanto somente 25 anos depois, foi normalizado como ASTM B 117 [64].

Este ensaio consiste em pulverizar amostras, que se encontram numa câmara com temperatura controlada, com uma solução de 5% de sal (NaCl). As amostras testadas são inseridas na câmara, onde a solução salina é pulverizada como uma fina névoa sobre as amostras e a temperatura dentro da câmara é mantida constante. Já que a pulverização é contínua, as amostras estão constantemente húmidas, e portanto sujeitas à penetração de iões cloreto [65].

No entanto, o ensaio de névoa salina sempre foi alvo de inúmeras críticas por parte de muitos pesquisadores, por não possuir relação com a maioria das condições de exposição real. Três exemplos mais significativos são: a superfície das amostras são constantemente humedecidos, sem ciclo de secagem, o que não acontece na realidade; a temperatura da câmara de ensaio fica constante a 35°C, o que leva a um acréscimo do transporte de água, oxigénio e iões em comparação com ambientes externos; o conteúdo de cloreto, 5%, é muito elevado [66].

Monteiro e Helene (2003) [63], utilizaram o ensaio da câmara de névoa salina durante 91 dias, acrescentando semicíclos de imersão e secagem de modo a estudar o método de extração eletroquímica de cloretos para a reabilitação de estruturas de betão com questões de corrosão.

Bellei e Lima (2005) *apud* Malheiro (2008) [6], utilizaram a câmara de névoa salina durante 1728 horas, num estudo relacionado com o desempenho de perfis estruturais metálicos soldados por alta frequência utilizados na construção civil.

2.4.3 Ciclos de imersão e secagem

Quando falamos em ataque de cloretos no meio ambiente, os ciclos de imersão e secagem são frequentemente os mais agressivos para que ocorra corrosão das armaduras e penetração de cloretos no betão. Em tempos, para obter um modelo simplificado de cálculo de transporte de iões, muitos autores baseavam-se na segunda lei de Fick [67].

Atualmente, o modelo de transporte de iões cloreto no betão através de ciclos de imersão e secagem tem sido abordado por diversos autores, no entanto poucas informações estão disponíveis [68]. Apesar de ainda não estarem normalizados, estes ensaios são cada vez mais frequentes quando se deseja acelerar o processo de despassivação das armaduras no betão, onde muitas vezes estão associados a medidas eletroquímicas que permitem identificar o período de iniciação e período de propagação da corrosão [69]. Encontramos, portanto, inúmera literatura, mas por não existir uma normalização, podemos observar para diversos estudos diferentes condições de exposição, variações da concentração de soluções e diferentes períodos de imersão e secagem.

Este ensaio consiste em duas fases principais. Numa primeira fase, de molhagem, os cloretos dissolvidos penetram para o interior do betão pelo fenómeno da absorção capilar, passando, alguns deles, para a pasta cimentícia por difusão. Numa segunda fase, de secagem, os iões subsistem no interior dos poros fixos por adsorção simultaneamente com moléculas de água,

que originam a película que reveste o interior do poro, como se esquematiza na Figura 2.32 [7].

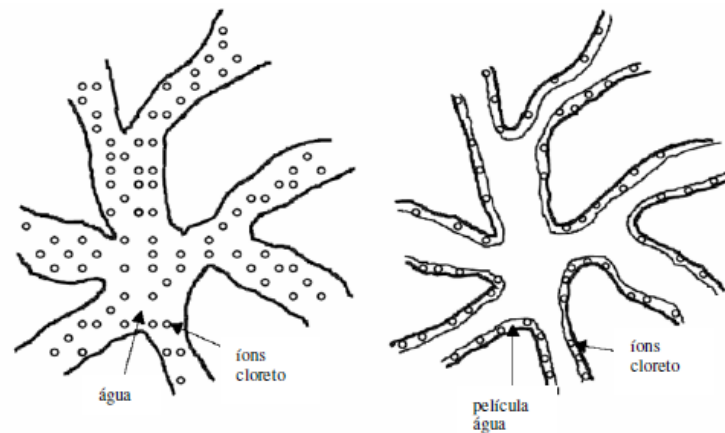


Figura 2.32 - Penetração de cloretos através do mecanismo de molhagem (figura da esquerda) e secagem (figura da direita) [7].

O processo de difusão dos íons cloreto continua, mesmo no período de secagem, contudo a uma velocidade diferente. No período seguinte de molhagem, com a introdução de mais água com cloretos, os íons adsorvidos e ainda não difundidos para o interior da pasta fazem com que a concentração de cloretos na superfície dos poros aumente e o processo de difusão para o interior seja mais intenso. Deste modo, o perfil de cloretos apresenta-se, em geral, diferente para contextos de alternância de molhagem/secagem ou situações onde a humidade relativa é sensivelmente constante (Figura 2.33).

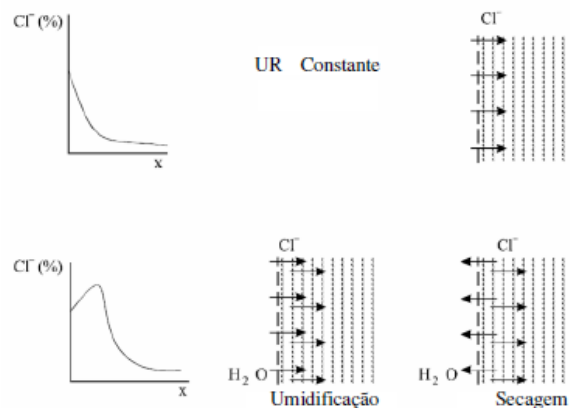


Figura 2.33 - Penetração de cloretos em ambiente aéreo (humidade relativa constante) e ambiente sujeito a ciclos molhagem/secagem [7].

Este ensaio vai ao encontro de estudos realizados por distintos autores, como é o caso de McPolin *et al.* (2005) [70], que investigou a penetração de cloretos com uma duração total de ciclos de imersão e secagem de 48 semanas, com as amostras a serem colocadas segundo uma temperatura de 20°C e com uma humidade relativa de 40%. A solução aquosa continha 0,55 mol de NaCl, e durante o período total de ensaio cumpria ciclos de 1 dia de molhagem e 6 dias de secagem. Para diferentes tipos de cimento, a penetração dos cloretos no betão rondou valores entre os 15 mm e os 25mm. Outro estudo que se pode destacar é de Wu *et al.* (2016) [67], que procedeu ao estudo dos ciclos de imersão e secagem e paralelamente de imersão, com diferentes períodos de ensaio e diferentes concentrações de razão a/l. O autor verificou que as amostras sujeitas aos ciclos de imersão e secagem tiveram uma maior penetração de cloretos que as amostras sujeitas a imersão total, com valores de penetração entre 10-15mm e 5-10mm, respetivamente. Também foi possível observar uma maior penetração de cloretos, paralelo ao aumento do tempo de ensaio. Polder e Peelen (2002) [71], estudaram de que forma diferentes razões de a/l influenciavam a penetração de cloretos. Para o efeito, os autores utilizaram 26 ciclos semanais com 24 horas de molhagem numa concentração de 3% de NaCl, com seis dias de secagem, concluindo que para uma razão a/l de 0,55 a penetração de cloretos é superior a uma mistura com 0.45 de razão a/l.

Na tabela seguinte (Tabela 2.10) apresenta-se num estudo mais exaustivo uma revisão bibliográfica com todas as variáveis que foram consideradas principais para definir o procedimento experimental, designadamente a quantidade de NaCl na solução, as variações do tempo de molhagem e secagem dos ciclos, o período total dos ciclos, a razão água/ligante, a utilização de betão ou argamassa e a presença ou não de CO₂ na fase de secagem.

Tabela 2.10 - Referências bibliográficas onde foram utilizados os ensaios de imersão e secagem

Data	Autor (S)	Título	Nacl	Sobre Os Ciclos	Período De Ensaio	A/L	Betão Ou Argamassa	Tipo De Cimento	Presença CO ₂ Na Secagem
sd	A. Costa e J. Appleton	Análise da penetração de cloretos em estruturas de betão armado expostas ao ambiente marítimo	16-21 g/l	22 ciclos de enchimento durante 4 anos + 120 ciclos de enchimento durante 5 anos	5 anos	0,35	betão	tipo 1, 500 kg/m ³	sim
1999	K. Hong e R. Hooton	<i>Effects of cyclic chloride exposure on penetration of concrete cover</i>	1 mol	Foram utilizados dois diferentes ciclos com o total de 1 dia e 3 dias. No caso dos ciclos de 1 dia realizaram-se períodos de molhagem de 6 horas com um tempo de secagem de 18 horas; Relativamente aos ciclos de 3 dias apenas se prolongou o tempo de secagem, mantendo o de molhagem.	As séries de um dia foram repetidas até um total de 36 dias, sendo que as de três dias foram repetidas 25 vezes	0,4 e 0,3	betão	Portland comum (CSA type 10 low-alkali)	não
2002	Polder <i>et al.</i>	<i>Characterization of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity</i>	3%	24 horas de molhagem + 6 dias de secagem	30 semanas	0,4, 0,45 e 0,55	betão	Portland comum	não
2005	McPolin <i>et al.</i>	<i>Obtaining progressive chloride profiles in cementitious materials</i>	0,55 mol	1 dia de molhagem + 6 dias de secagem	48 semanas	0,55	betão	Portland comum	não
2006	B. Oh e S. Jang	<i>Effects of material environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures</i>	3,50%	1 dia de molhagem + 1 dia de secagem	15 semanas	0,5	betão	Portland comum	não
2008	Raphaelle Malheiro	Influência do revestimento de argamassa no transporte de cloretos em estruturas de concreto armado inseridas no meio urbano	3%	ciclos de 1, 2 e 3 dias de molhagem e 4, 5, 6 e 7 dias de secagem	49 dias	0,55	argamassa	Portland comum	sim

Data	Autor (S)	Título	Nacl	Sobre Os Ciclos	Período De Ensaio	A/L	Betão Ou Argamassa	Tipo De Cimento	Presença CO ₂ Na Secagem
2010	Balouch <i>et al</i>	<i>Surface corrosion of steel fibre reinforced concrete</i>	35 g/l	1 semana de molhagem + 1 semana de secagem	7 meses	0,78	betão	CEM 52,5 R	não
2010	Vieira <i>et al.</i>	Estudo de inibidores de corrosão em concreto armado	3,50%	3 dias de molhagem + 4 dias de secagem	3 meses	0,5	betão	Portland CII-Z/32	não
2012	C. Trevisol e F. Pelisser	Análise do desempenho de ânodo de sacrifício para proteção de estruturas de concreto armado contra corrosão	3,50%	3 dias de molhagem + 4 dias de secagem	42 dias	0,65	betão	Portland CPV - ARI	não
2012	Ye <i>et al.</i>	<i>Model of chloride penetration into cracked concrete subject to drying-wetting cycles</i>	5%	6 horas de imersão + 18 horas de secagem	90 dias	0,53	betão	Portland comum	não
2012	Wei <i>et al.</i>	<i>Corrosion evolution of reinforcing steel in concrete under dry/wet cyclic conditions contaminated with chloride</i>	3,50%	1 dia de molhagem + 4 dia de secagem	70 dias	0,5	argamassa	Portland comum	não
2014	Malheiro <i>et al.</i>	Influência da carbonatação no transporte de cloretos em argamassas submetidas à ação combinada destes dois agentes	3,50%	Ciclo A: 2 dias de molhagem + 12 dias de secagem (CO ₂); Ciclo B: 2 dias de molhagem + 12 dias de secagem (laboratório)	56 e 168 dias	0,56	argamassa	CEM I 42,5 R	4%
2015	Yu <i>et al.</i>	<i>Accelerated simulation of chloride ingress into concrete under drying-wetting alternation condition chloride environment</i>	5%	Total: 3, 4 e 8 meses	8 meses	0,4, 0,5 e 0,6	betão	CEM I 42,5 R	não
2015	Gustavo Camacho	A ação combinada da carbonatação e dos cloretos: avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em betões carbonatados	5%	Imersão durante 4 meses	4 meses	0,55	argamassa	CEM I 42,5 R	5%

Data	Autor (S)	Título	Nacl	Sobre Os Ciclos	Período De Ensaio	A/L	Betão Ou Argamassa	Tipo De Cimento	Presença CO ₂ Na Secagem
2015	Garzón-Roca et al.	<i>Effect of wet-dry cycles on the bond behaviour of concrete elements strengthened with NSM CFRP laminate strips</i>	3%	12 horas de molhagem + 12 horas de secagem	720 dias		betão	Portland comum	não
2015	Simčič et al.	<i>Chloride ion penetration into fly ash modified concrete during wetting-drying cycles</i>	10%	6 horas de imersão + 18 horas de secagem	21, 42, 84, 105 e 126 dias	0,45	betão	Portland comum	não
2016	Ye et al.	<i>Chloride penetration in concrete exposed to cyclic drying-wetting and carbonation</i>	15%	Três situações: na primeira ocorreu 4 dias de molhagem + 2 dias de secagem em ambiente natural; na segunda as amostras estiveram 2 dias de molhagem e 2 dias de secagem em carbonatação acelerada; numa última situação as amostras encontraram-se 2 dias em molhagem + 4 dias em de secagem em carbonatação acelerada	6 dias	0,35	betão	Portland comum	20 ± 3%
2016	Wu et al.	<i>Transport model of chloride ions in concrete under loads and drying-wetting cycles</i>	3%	8 horas molhagem + 8 horas secagem	90 dias	0,33, 0,39, 0,45	betão	CEM I 42,5 R	não
2016	L. Jiang e D. Niu	<i>Study of deterioration of concrete exposed to different types of sulfate solutions under drying-wetting cycles</i>	10%	7 dias de molhagem + 8 dias de secagem	360 dias	0,45	betão	Portland comum	não

2.4.4 Difusão natural

A difusão natural é um método utilizado com o objetivo de estudar a previsão de penetração de cloretos, podendo ser aplicado em regime estacionário ou não estacionário, como por exemplo um arranjo experimental onde se posicione a amostra estudada entre duas células, numa contida uma solução de NaCl e na outra sem esta adição, admitindo a movimentação destes iões devido apenas à diferença de concentração (Figura 2.34) [33].

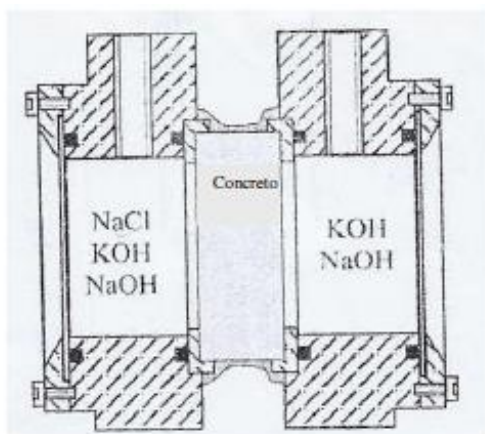


Figura 2.34 - Arranjo experimental utilizado no método da difusão natural [33].

Este ensaio também pode ser definido como um mecanismo de avaliação de penetração de cloretos, consistindo em não utilizar qualquer tipo de mecanismo adicional para que suceda a translação de massa entre regiões de forte e de fraca concentração, mais precisamente, sem aplicação de um campo elétrico [33]. Este conceito pode ser aplicado aquando da imersão de amostras numa solução que contém NaCl, na proporção desejada, com a grande vantagem do custo que se encontra envolvido [33].

Este tipo de ensaio é abordado por diversos autores, onde se verifica uma grande semelhança e uniformização no que diz respeito à proteção das faces dos provetes em estudo, com o principal objetivo de simular o fluxo unidirecional. Para tal, todas as faces da amostra são revestidas, geralmente com uma pintura de resina epóxi, exceto duas faces opostas que são deixadas livres para deixar que os iões cloreto penetrem ([52]; [59]; [72]).

Autores como Oh *et al.* (2006) [49], procederam à investigação dos efeitos do material e do clima na penetração de cloretos em estruturas de betão, onde utilizaram a difusão natural através da imersão, bem como o ensaio de exposição natural. Posteriormente procederam à

comparação dos resultados entre os dois tipos de exposição, onde as amostras imersas estavam numa solução que continha 3,5% de NaCl com um período total de ensaio de 15 semanas, concluindo pelos resultados obtidos que a penetração de cloretos em exposição natural pode ser razoavelmente prevista utilizando este ensaio. Também Lindvall (2007) [51], realizou a comparação entre a difusão natural e a exposição real. Neste caso as amostras estavam submersas sob duas diferentes concentrações de 8,3 g de NaCl e 33,0 g de NaCl, representativas do mar Báltico e oceano Atlântico, respetivamente. Foi possível concluir que em exposição real a temperatura da água do mar foi o principal fator influenciador da penetração de cloretos em detrimento da percentagem de NaCl na água, enquanto que, em condições de laboratório, a situação foi a oposta. No entanto, estes testes em condição de imersão também podem ser aplicados não só em betões, como também em argamassas e pastas de cimento. Masi *et al.* (1997) [73], utilizaram este método para simular a penetração de cloretos, fazendo variar a concentração de NaCl em 0,02, 0,05, 0,1, 0,25, 0,5 e 1 mol/L e a razão a/l em 0,3, 0,5 e 0,7. Concluíram que os casos mais desfavoráveis sucederam quando o provete esteve submerso durante 161 dias numa solução com 3 % de NaCl e depois mais 365 dias em água pura e quando para uma solução de 1 mol/L e razão a/l de 0,5, o provete esteve submerso durante 100 dias.

2.5 Métodos de determinação de cloretos no betão

De forma a determinar a penetração de cloretos no betão, podemos recorrer a métodos que envolvam técnicas analíticas, por via húmida, como a gravimetria, a titulometria, a potenciometria, e métodos microanalíticos como a cromatografia de iões (menos utilizados) [24].

O método gravimétrico é aplicado à medição da penetração dos cloretos e consiste em pesar a quantidade de cloretos de prata, a partir da solução de cloreto. Esta metodologia não é apropriada a baixos teores de cloretos como o que acontece normalmente, por estar presente numa solução concentrada em relação a outros iões que impurificam a solução formada [74].

A titulometria, anteriormente designada por análise volumétrica, designa a análise quantitativa praticada através da determinação do volume de uma solução, cuja concentração é conhecida, requerida para reagir quantitativamente com a solução da substância a ser determinada [74].

A potenciometria reside em medir a diferença de potencial entre dois elétrodos, onde existe o de referência, de potencial conhecido, e um eletrodo indicador cujo potencial depende da concentração de uma espécie iônica em solução [75]. Este método é adotado pela ASTM para a determinação dos cloretos presentes no betão, segundo a norma ASTM C 1152 [76], tendo sido publicada a aplicação deste método segundo três diferentes tipos de betão sujeitos à presença de cloretos por Kayali e Zhu (2000) [77].

Em contrapartida, o método colométrico baseado em nitrato de prata (AgNO_3) para a medição da profundidade de penetração de cloretos na matriz cimentícia tem a grande vantagem de ser rápido e prático ([75];[78]). No entanto, a sua eficiência e condições de aplicação devem ser bem entendidas de modo a que se possa garantir as possíveis vantagens de aplicação desta técnica [79].

Historicamente, o desenvolvimento do método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata teve início na Itália, no ano de 1970, por Collepari, caracterizado por ser um método qualitativo que permite identificar a presença de cloretos livres em materiais com base cimentícia ([80]; [81]).

Este método de aspersão de nitrato de prata tem sido bastante utilizado no ensaio acelerado de migração de cloretos que pode ser estabelecido pelo LNEC E463 [41], método nacional, e ASTM C1202/05, método americano [82]. De modo a conhecer a presença de iões cloreto nas amostras, estas devem ser fraturadas e aspergir uma solução aquosa com 0,1 mol de AgNO_3 [35].

O método colorimétrico tem como principal aplicação determinar a profundidade da frente de penetração de cloretos que penetram no betão por fenómenos de absorção associados à difusão. Depois de aspergida a solução de nitrato de prata na superfície de betão, acontece uma reação fotoquímica, com a formação de duas cores distintas: uma primeira de cor esbranquiçada do cloreto de prata, indicador da presença de cloretos, e uma segunda cor castanha, correspondente à região livre de cloretos (Figura 2.35) [35].



Figura 2.35 - Separação da zona de cor branca com separação de clareos e zona de cor castanha com ausência dos mesmos.

Como podemos observar na figura anterior, a penetração de clareos não é uniforme, e portanto a norma LNEC E463 [41] aconselha a realização de sete medidas a cada 10 mm desde o centro até ambos os bordos, onde o resultado é a média entre todas elas (Figura 2.36). O ponto de mediação deve ser alterado ou ignorado no caso de impossibilidade de leitura pela presença de agregados.

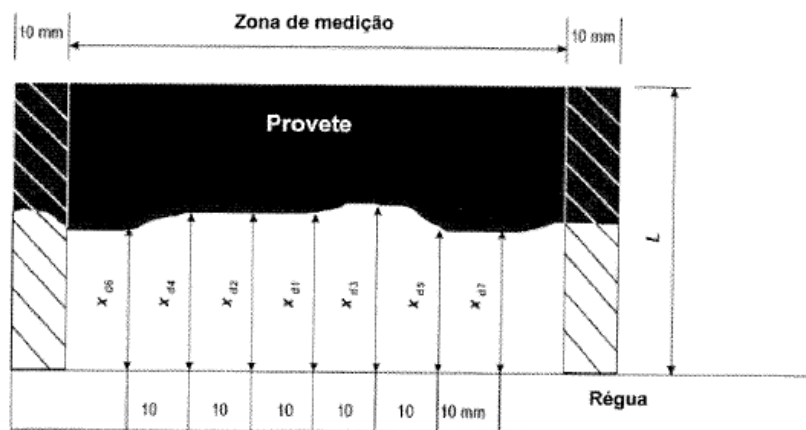
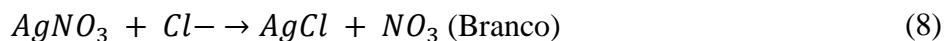


Figura 2.36 - Medidas da penetração de clareos [40].

A presença de clareos pode ser definida segundo duas reações químicas, uma onde existe clareos livres (8) e outro com a presença de carbonatos onde também existe a formação de um precipitado branco, indicado na reação (9) [80].



Alguns autores utilizaram este método como é o caso de McPolin *et al.* (2005) [70], que para obter a penetração progressiva dos cloretos em amostras de betão sujeitas a ciclos de imersão e secagem, utilizou uma solução contendo 0,05 mol de nitrato de prata e com a variação de cores foi possível calcular esta profundidade. Elfmarkova *et al.* (2015) [61], utilizou a aspersão de nitrato de prata para determinar a penetração de cloretos em argamassas que continham diversas adições. Também Yuan *et al.* (2012) [83], estudou a aplicação do método colorimétrico em diversas soluções de betão, com o objetivo de determinar a difusão da penetração de cloretos em regime não-estacionário.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados, de forma pormenorizada, todos os procedimentos de ensaio realizados ao longo da investigação, bem como a clara definição e caracterização dos materiais utilizados, além da forma como os provetes foram preparados e os ensaios utilizados para atingir os objetivos específicos deste trabalho.

Optou-se por trabalhar com uma argamassa porosa em detrimento do betão, pois como o tempo de ensaio é curto, os agentes agressores penetram mais rapidamente na argamassa e, conseqüentemente, obtêm-se resultados mais expressivos num curto espaço de tempo.

Na parte final são descritos e apresentados os ensaios de imersão e secagem que serviram de base para o estudo da dissertação, ensaios estes que permitiram, após a comparação de resultados, avaliar de que forma a variação de alguns parâmetros influenciam, ou não, a penetração de cloretos.

3.2 Caracterização dos materiais no estudo

3.2.1 Água

A água utilizada durante a pesquisa, tanto para a moldagem das amostras como para a execução dos demais serviços, foi proveniente da rede pública de abastecimento de água de Guimarães, com uma quantidade média de cloro detetado na água de 0,6 mg/l, irrelevante para este estudo.

3.2.2 Cimento

O cimento utilizado para a constituição da amassadura e posterior preparação dos provetes, proveniente da SECIL – Fábrica de Maceira-Liz, foi o CEM I 42,5R, encontrando-se em conformidade com as especificações da NP EN 197-1 [84].

As composições químicas, propriedades físicas e mecânicas do cimento em questão, encontram-se presentes na Tabela 3.1, Tabela 3.2 e Tabela 3.3, respetivamente.

Tabela 3.1 - Composição química do cimento CEM I 42,5R [85].

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
Cloretos	Cl ⁻	

Tabela 3.2 - Propriedades físicas do cimento CEM I 42,5R [85].

Propriedade	Valor
Peso Específico (g/cm ³)	3,13
Resíduo de peneiração - 45 µm (%)	3,02
- 32 µm (%)	
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 [85].

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 Agregado fino

O agregado utilizado na preparação dos provetes foi uma meia areia natural, rolada e siliciosa, fornecida pela empresa Mibal. Este agregado foi sujeito a uma análise granulométrica de acordo com a norma NP EN 933-1 [86].

3.3 Preparação dos provetes

Os provetes utilizados para os ensaios laboratoriais foram desenvolvidos com o intuito de simular amostras sujeitas ao ataque de cloretos.

3.3.1 Análise granulométrica

Antes de iniciar a amassadura, procedeu-se a uma análise granulométrica para caracterizar a areia utilizada. Esta consistiu numa primeira fase de secagem numa estufa a 105 °C até a obtenção de uma massa constante que é obtida por pesagens sucessivas efetuadas após secagem com pelo menos 1 hora de intervalo, não diferindo mais que 0,1 % (NP EN 933-1 [86]). De seguida, seleccionámos um conjunto de peneiros, sendo a dimensão das aberturas e o número de peneiros de acordo com a natureza da amostra e a precisão exigida. A amostra utilizada foi de 600g, pois a máxima dimensão do agregado era de 8 mm NP EN 933-1 [86]. Depois de organizados os peneiros, a amostra foi colocada e agitada manualmente Figura 3.1 e numa fase posterior com auxílio mecânico Figura 3.2. A areia retida em cada peneiro foi pesada numa balança de precisão de 0,1g.



Figura 3.1 - Agitação manual.



Figura 3.2 - Agitação com auxílio mecânico.

Os resultados são expostos em termos de distribuição mássica em função da abertura da malha dos peneiros, designada de curva granulométrica (Figura 3.3). Para além da representação gráfica, este ensaio permitiu determinar a máxima dimensão do agregado, $D_{máx}$, definida pela malha do peneiro de menor dimensão através da qual passa, pelo menos, 90 % da massa do agregado; a mínima dimensão do agregado, D_{min} , definida pela malha de maior dimensão pela qual passa uma percentagem inferior ou igual a 5% da massa do agregado; e, por último, o módulo de finura do agregado, definido pelo quociente da soma das massas retidas acumuladas nos peneiros da série principal multiplicando por 100.

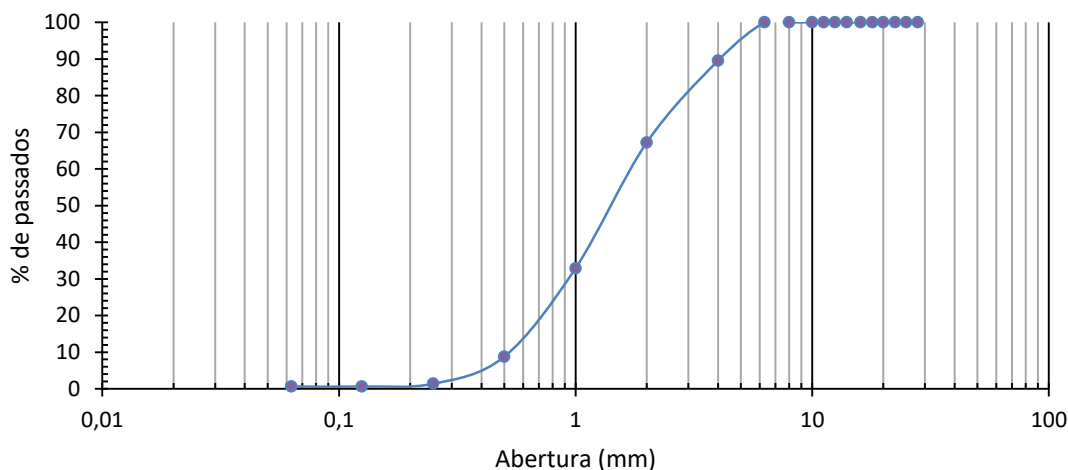


Figura 3.3 - Curva granulométrica do agregado.

3.3.2 Produção da argamassa e preparação dos provetes

É essencial pesar todos os constituintes da argamassa, para que aquando do processo da mistura, todos os componentes se encontrarem disponíveis, nas corretas proporções, com o objetivo de tudo estar devidamente preparado para a realização da amassadura.

Foram utilizados utensílios como a balança, tabuleiros metálicos para pesar a areia e o cimento, recipiente de vidro para a água e um misturador mecânico. O misturador consta essencialmente de um recipiente de aço inoxidável com capacidade de cerca de 5L e é equipado de forma a ser fixado firmemente à armação do misturador durante a amassadura, contendo também uma pá misturadora em aço inoxidável.

Para a constituição da argamassa foi utilizada a razão 1:3 de cimento (Kg) e areia (Kg), ou seja, para cada unidade de cimento deve-se utilizar 3 unidades de areia. Para a determinação da razão água/ligante, fixámos o espalhamento em 180mm de acordo com o trabalho desenvolvido no âmbito do Programa Doutoral em Engenharia Civil da Universidade do Minho “Durabilidade do betão à ação combinada da carbonatação e dos iões cloreto considerando a presença de cinzas volantes”. Para alcançar o espalhamento pretendido, a amassadura foi iniciada com um valor arbitrário de água, onde seguidamente foi feito um processo iterativo de acrescentar 0,2 L até que alcançássemos o espalhamento pretendido. Aquando do seu alcance verificou-se uma razão água/ligante de 0,54.

Para a preparação da argamassa, utilizou-se o seguinte procedimento: inicialmente juntar o cimento e areia no vaso; adicionar cerca de 1/3 da água e ligar a misturadora durante 1 minuto; de seguida adicionar mais água e ligar a misturadora 30 segundos; por último adicionar a água restante e fazer misturar mais 30 segundos. Com a ajuda da espátula voltar a misturar, para que possamos garantir que todos os materiais ficaram corretamente associados (Figura 3.4). Este procedimento já foi utilizado noutros trabalhos como o caso de Malheiro *et al.* [4] e Camacho [1].



Figura 3.4 - Auxílio de uma espátula para tentar garantir que todos os componentes ficam corretamente associados.

Findada a composição da amassadura, foram moldadas todas amostras de argamassa, com dimensões 5x5x5 cm³.

Estas dimensões foram utilizadas afim de facilitar o manuseio das peças em laboratório, poupar na argamassa e, pelo estudo ser num período de tempo curto (2 meses), considerou-se que a penetração não seria superior à dimensão da aresta. Na colocação da argamassa nos moldes, teve-se o cuidado de garantir o total enchimento do molde. Para tal, a argamassa foi colocada em duas camadas e teve-se o cuidado de minimizar o volume de vazios através de picagem com a espátula (Figura 3.5).

Para tentar evitar, ou dificultar, a evaporação de água na mistura, a fim da moldagem colocou-se uma película plástica por cima dos moldes.



Figura 3.5 - Colocação das duas camadas de argamassa no molde.

As amostras permaneceram 24 horas em câmara húmida, com temperatura e humidade relativa em cerca de 18°C e 93%, respetivamente, onde ao fim deste período foram “desmoldadas” e colocadas dentro de água, em câmara húmida, até às datas de ensaio.

De modo a que a penetração dos cloretos ocorresse apenas por uma face, tornando assim a penetração unidimensional, todas as restantes faces foram pintadas com uma tinta epóxi. Todo este processo decorreu durante três dias, tendo no primeiro dia sido colocada uma camada fina de epóxi (Figura 3.6a), no segundo dia passou-se uma segunda camada com o objetivo de tapar os poros abertos (Figura 3.6b) e no terceiro dia, os poros que ainda não se encontravam totalmente cobertos foram identificados e totalmente cobertos (Figura 3.6c). Concluído este processo, os provetes estiveram a secar durante mais três dias em ambiente de laboratório com temperatura e humidade relativa em cerca de 23°C ± 2 e 70% ± 2, respetivamente.



Figura 3.6 - Processo de pintura dos cubos com tinta epóxi.

3.4 Características das argamassas

3.4.1 Estado fresco

De forma a seguir os princípios normativos para as amassaduras, foi realizado o ensaio de espalhamento, segundo a norma EN 1015-3 [87]. Este tipo de ensaio funciona como um instrumento que permite verificar o controlo de qualidade das amassaduras, possibilitando detetar eventuais alterações na composição, em especial nas diferenças de quantidade de água adicionada, e posterior alteração da razão a/l. Este ensaio faz uso de três utensílios, ou seja, um disco, um molde e um compactador. Numa primeira fase, o disco, a superfície interna e as superfícies do molde foram limpas com um pano e lubrificadas com um óleo mineral de baixa viscosidade (Figura 3.7a).

O molde foi colocado na zona central do disco e foi introduzida a argamassa em duas camadas: uma primeira até cerca de metade do molde, onde com a ajuda de um compactador foram dadas dez pancadas com o intuito de assegurar o enchimento do molde (Figura 3.7b); numa segunda fase procedeu-se ao enchimento total do molde, onde foram mais uma vez dadas dez pancadas para a uniformização da argamassa dentro do molde. O excesso de argamassa que fica no molde e no disco foi retirado com uma espátula ou um pano seco, de modo a assegurar que nada interfere no espalhamento. Retirado o molde (Figura 3.7c), elevou-se verticalmente o disco, procedimento também designado por “pancadas”, durante cerca de 15 segundos, frequência de cerca de uma “pancada” por segundo, com o objetivo de espalhar a argamassa no disco. Estando este processo concluído, o espalhamento foi medido com um auxílio de uma régua, em duas direções perpendiculares, sendo o espalhamento a média dos dois valores (Figura 3.7d).



Figura 3.7 - Procedimento do ensaio de espalhamento.

3.4.2 Estado endurecido

De modo a caracterizar o comportamento dos provetes de argamassa no seu estado endurecido, foram efetuados três ensaios: o ensaio da resistência à compressão, o ensaio de absorção de água por capilaridade e o ensaio de absorção de água por imersão.

O ensaio da resistência à compressão foi realizado segundo a norma NP EN 12390-3 [88], seguindo determinados procedimentos: inicialmente o provete foi cuidadosamente limpo, de modo a remover qualquer resíduo ou material estranho das superfícies; o posicionamento dos provetes foi o mais centralizado possível, para que a carga fosse aplicada perpendicularmente à direção de moldagem; foi aplicada uma carga com uma velocidade constante de 2,4 kN/s. Todos os provetes ao fim de rompidos apresentavam uma forma de prisma, o que, segundo a norma aprova a correta rotura.

A absorção de água por capilaridade é definida na especificação LNEC E393 [32] como a “diferença entre a massa do provete de betão endurecido que esteve com uma das faces em contacto com a água durante um determinado tempo e a massa do provete seco, dividida pela área da superfície em contacto com a água”. A realização do ensaio baseou-se nos procedimentos descritos nesta mesma especificação. O ensaio inicia-se com a secagem dos provetes numa estufa regulada com uma temperatura de 50°C, durante 14 dias. Findo este período, os provetes foram arrefecidos naturalmente até atingirem a temperatura ambiente.

De seguida, todas as faces do provete, adjacentes à face através da qual ocorrerá a absorção de água, foram isoladas com silicone, de forma a permitir que a absorção fosse efetuada exclusivamente através de uma das faces, neste caso a face inferior. Após a preparação dos provetes, estes foram colocados num recipiente próprio, enchendo-se cuidadosamente com água até que o nível atingiu um valor de 5 ± 1 mm acima da face inferior do provete, evitando molhar as outras faces do mesmo (Figura 3.8).

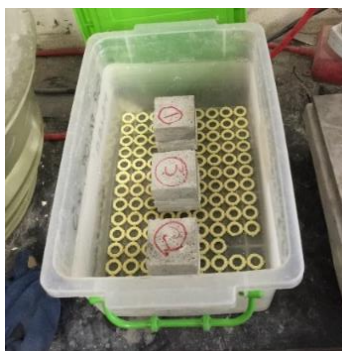


Figura 3.8 - Ensaio de capilaridade em curso.

Em seguida, foram executadas sucessivas pesagens até um total de 20 dias, tempo necessário para a saturação da rede capilar do provete, de forma a quantificar a água que foi absorvida. Foram cumpridos intervalos de tempo definidos de pesagem, com início no primeiro contacto do provete com a água, com o cuidado de antes da pesagem escorrer e limpar com um pano toda a água superficial.

Na Tabela 3.4 estão presentes as frequências com que os provetes foram pesados no ensaio de absorção de água por capilaridade, a partir de uma massa inicial, M_0 , de 0,273 kg:

Tabela 3.4 - Tempo de pesagens dos provetes no ensaio de absorção de água por capilaridade.

Pesagem	Tempo	Valor da massa M_i (kg)
1	10 min	0,274
2	30 min	0,275
3	60 min	0,276
4	90 min	0,276
5	120 min	0,277
6	150 min	0,278
7	180 min	0,278
8	240 min	0,279
9	5 h	0,280
10	6h	0,280
11	7h	0,281
12	1 dia	0,287
13	2 dias	0,291
14	6 dias	0,295
15	7 dias	0,292
16	8 dias	0,292
17	10 dias	0,292
18	13 dias	0,293
19	14 dias	0,293
20	15 dias	0,293
21	16 dias	0,293
22	17 dias	0,293
23	20 dias	0,293

Finalizadas as pesagens, a absorção por capilaridade no tempo, t_i , pode ser calculada, dividindo o aumento da massa $M_i - M_0$ pela área da face inferior do provete que esteve em contacto com a água.

Já a absorção de água por imersão é definida na especificação LNEC E394 [89] como a “diferença entre a massa do provete de betão endurecido imerso em água e a massa do mesmo provete quando seco”. A realização do ensaio baseou-se nos procedimentos descritos nesta mesma especificação.

Para este ensaio, foram aproveitados os provetes utilizados na absorção de água por capilaridade, o que fez com que apenas fosse necessário confirmar a saturação dos provetes. Tal como aconteceu no ensaio anterior, considerou-se alcançada uma massa constante do provete saturado (m_1), quando a diferença entre duas pesagens consecutivas, separadas de menos de 24 horas, for inferior a 0,1% da média das duas leituras. Antes de cada pesagem, de modo a remover toda a água superficial, teve-se o cuidado de secar a superfície do provete com um pano absorvente. Após alcançada a massa constante, procedeu-se à pesagem dos provetes imersos em água, sendo registadas todas as pesagens (m_2). A massa do provete seco, m_3 , é a mesma massa seca que foi utilizada para o ensaio de absorção por capilaridade. Tendo todos os parâmetros calculados, o valor de absorção de água por imersão, em percentagem, foi calculado tendo por base na equação (10), presente na especificação LNEC E394 [89]:

$$A = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \quad (10)$$

3.5 Ensaio acelerado – Ciclos de imersão e secagem

O estudo de argamassas sujeitas a ciclos de imersão e secagem é de elevada importância, pois é o ensaio que mais se aproxima da realidade, acelerando a penetração de cloretos e encontra-se em grande parte da revisão bibliográfica deste tema ([44] e [72]).

Optou-se então por estudar os seguintes parâmetros: tempo de molhagem; tempo de secagem; concentração de NaCl; presença de hidróxido de cálcio na solução de imersão; presença de CO₂ no ambiente de secagem, ciclos pequenos, 7 dias, e ciclos grandes, 14 dias. Os ciclos tiveram um período total de 2 meses, onde também foi efetuado paralelamente o ensaio de difusão por imersão com o objetivo de comparar a velocidade de penetração de cloretos dos dois ensaios.

Antes de iniciar os ciclos, os provetes foram saturados. Durante a secagem dos provetes, as condições ambientais, tais como temperatura, humidade e CO₂, foram monitorizadas, tendo-se registado um valor médio de 21°C, 69% e 360ppm, respetivamente.

3.5.1 Variação do tempo de molhagem/secagem

Para o ciclo de 7 dias optou-se por fazer três diferentes situações de molhagem/secagem: dois dias de molhagem e cinco dias de secagem; três dias de molhagem e quatro dias de secagem; quatro dias de molhagem e três dias de secagem.

Para o ciclo de 14 dias optou-se por fazer três diferentes situações de molhagem/secagem: sete dias de molhagem e sete dias de secagem; seis dias de molhagem e oito dias de secagem; oito dias de molhagem e seis dias de secagem.

Por último, estudou-se também a imersão total durante a totalidade do ciclo de 60 dias.

3.5.2 Variação da percentagem de NaCl

Relativamente à variável da concentração de NaCl na solução de imersão, considerou-se importante estudar a variação em três diferentes percentagens: 3,5%, correspondente à salinidade média da água do mar, 5% e 10%, de modo a compreender se a quantidade de sal tem, ou não, uma grande interferência na penetração de cloretos.

3.5.3 Presença ou não de hidróxido de cálcio

Esta variável considerou-se importante estudar, pois a presença ou não de hidróxido de cálcio na solução aquosa da fase de molhagem, pode implicar que possa haver uma maior facilidade ou não na penetração de cloretos nos provetes. A argamassa quando imersa em água, liberta hidróxido de cálcio para a solução aquosa, sendo que a presença prévia da mesma (solução saturada) faz com que haja um equilíbrio entre o provete e a solução, fazendo com que o hidróxido de cálcio não seja lixiviado para o exterior do provete.

3.5.4 Presença ou não de CO₂ na secagem

A última variável consistiu na presença de CO₂ na secagem. Para aproximar o máximo da realidade, onde o CO₂ se encontra presente na secagem natural, considerou-se importante ter em conta este parâmetro, estudando paralelamente a carbonatação. Aquando colocados na câmara de carbonatação foram controlados os parâmetros de temperatura, humidade e quantidade de CO₂ de acordo com CEN/TS 12390-12 [90] que indica 20°C, 55 % HR e 4% CO₂. Para uma melhor compreensão, todas estas variáveis podem ser observadas na Tabela 3.5:

Tabela 3.5 - Variáveis nos ciclos.

Variáveis		CICLO		CICLO		IMERSÃO
		I (7 dias)		II (14 dias)		III (60 dias)
		Molhagem	Secagem	Molhagem	Secagem	Molhagem
Período de molhagem	1	2	5	7	7	60
	2	3	4	6	8	
	3	4	3	8	6	
Concentração NaCl	1	5%		5%		5%
	2	3,50%		3,50%		3,50%
	3	10%		10%		10%
Presença de Ca (OH) ₂ na solução de molhagem	1	Sim		Sim		Sim
	2	Não		Não		Não
Presença de CO ₂ na secagem	1	Sim		Sim		-
	2	Não		Não		-

3.5.5 Situações de estudo

Para o estudo foram utilizadas cinco situações, onde todos estes fatores descritos anteriormente se fizeram variar. Para uma melhor compreensão, foi designada como situação A a de referência e, de seguida, as situações B, C, D e E, descritos em abaixo:

•Situação A (referência): Concentração de NaCl de 3,50%, não tem presença de hidróxido de cálcio e não apresenta CO₂ na secagem (Tabela 3.6).

Tabela 3.6 - Situação de referência A.

SITUAÇÃO REFERÊNCIA						
A						
NaCl		3,50%				
Ca(OH) ₂		Não				
CO ₂		Não				
CICLO		CICLO			IMERSÃO	
I (7 dias)		II (14 dias)			III (60 dias)	
Molhagem	Secagem	Molhagem	Secagem	Molhagem		
2	5	7	7	60		
3	4	6	8			
4	3	8	6			

•Situação B: Concentração de NaCl de 5%, não tem presença de hidróxido de cálcio e não apresenta CO₂ (Tabela 3.7).

Tabela 3.7 - Situação B com variação de NaCl.

SITUAÇÃO B				
NaCl		5,00%		
Ca(OH) ₂		Não		
CO ₂		Não		
CICLO		CICLO		IMERSÃO
I (7 dias)		II (14 dias)		III (60 dias)
Molhagem	Secagem	Molhagem	Secagem	Molhagem
2	5	7	7	60
3	4	6	8	
4	3	8	6	

•Situação C: Concentração de NaCl de 10%, não tem presença de hidróxido de cálcio e não apresenta CO₂ (Tabela 3.8).

Tabela 3.8 - Situação C com variação de NaCl.

SITUAÇÃO C				
NaCl		10,00%		
Ca(OH) ₂		Não		
CO ₂		Não		
CICLO		CICLO		IMERSÃO
I (7 dias)		II (14 dias)		III (60 dias)
Molhagem	Secagem	Molhagem	Secagem	Molhagem
2	5	7	7	60
3	4	6	8	
4	3	8	6	

- Situação D: Concentração de NaCl de 3,50%, tem presença de hidróxido de cálcio e não apresenta CO₂ na secagem (Tabela 3.9).

Tabela 3.9 - Situação D com presença de hidróxido de cálcio.

SITUAÇÃO D				
NaCl		3,50%		
Ca(OH) ₂		Sim		
CO ₂		Não		
CICLO		CICLO		IMERSÃO
I (7 dias)		II (14 dias)		III (60 dias)
Molhagem	Secagem	Molhagem	Secagem	Molhagem
2	5	7	7	60
3	4	6	8	
4	3	8	6	

- Situação E: Concentração de NaCl de 3,50%, não tem presença de hidróxido de cálcio e apresenta CO₂ na secagem (Tabela 3.10).

Tabela 3.10 - Situação E com presença de CO₂ na secagem.

SITUAÇÃO E			
NaCl		3,50%	
Ca(OH) ₂		Não	
CO ₂		Sim	
CICLO		CICLO	
I (7 dias)		II (14 dias)	
Molhagem	Secagem	Molhagem	Secagem
2	5	7	7
3	4	6	8
4	3	8	6

3.5.6 Realização do ensaio

Para a realização dos ciclos de imersão e secagem foram utilizados três provetes para cada cenário, onde as situações A, B, C e D possuem sete cenários cada e a situação E possui apenas seis, fruto de não ter a imersão de 60 dias, perfazendo um total de 120 provetes.

Tendo em conta as variáveis de NaCl e presença, ou não, de hidróxido de cálcio, os provetes foram divididos por caixas distintas. Foram preparadas quatro caixas, uma com os provetes da situação A e E, por apresentarem a mesma concentração de NaCl, a segunda com a situação B com 5% de NaCl, uma terceira caixa com a situação C com 10% de NaCl, e por último a situação D com 3,5% de NaCl e presença de hidróxido de cálcio.

Para garantirmos a quantidade de NaCl em todas as situações estudadas, uma vez que, pode haver evaporação da água e, conseqüentemente, aumento da percentagem de NaCl, apesar das caixas onde se realizaram a imersão dos provetes estarem fechadas, todas as semanas as caixas foram lavadas e realizada uma nova solução.

A quantidade de solução utilizada respeitou a proporção 1:3, ou seja, para o volume de um provete corresponde a três vezes o mesmo volume de água e na solução saturada de hidróxido de cálcio foi utilizada 2,2 gramas por litro (Tabela 3.11).

Tabela 3.11 - Composição das diferentes caixas.

	NaCl (%)	Hidróxido de cálcio	Número de provetes	Volume provetes (cm ³)	Volume de água (L)
Situação A/E	3,50%	não	39	4875	14625
Situação B	5%	não	21	2625	7875
Situação C	10%	não	21	2625	7875
Situação D	3,50%	sim	21	2625	7875

Concluídos os dois meses de ciclo de imersão e secagem e de difusão, os provetes foram rompidos em tração por compressão e abertos perpendicularmente à face exposta (Figura 3.9).

De seguida, foi necessário preparar uma solução de nitrato de prata com uma concentração da solução de 0,1 mol [61], bem como uma solução preparada de fenolftaleína (solução com 50 ml de água, 50 ml de álcool e 0.1 g de fenolftaleína), já existente no laboratório.



Figura 3.9 - Rompimento dos provetes.

Depois de rompidos os provetes, o nitrato de prata foi aspergido nas duas metades dos provetes (Figura 3.100a), exceto na situação E, onde devido a presença de CO₂ na secagem, foi necessário medir numa metade a penetração de cloretos e na outra a profundidade de carbonatação (Figura 3.100b).

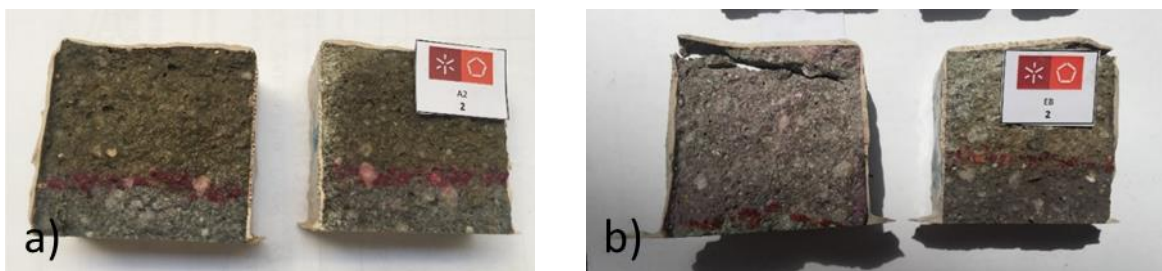


Figura 3.10 - Provetes aspergidos com nitrato de prata (a) e fenolftaleína e nitrato de prata (b).

Com o auxílio de um paquímetro, foram realizadas seis medições, três em cada metade do provete. Esta metodologia já foi utilizada em experiências anteriores em laboratório como é o caso de Meireles *et al* (2014) [59].

4 RESULTADOS

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados e analisados todos os resultados referentes ao programa experimental apresentado no capítulo anterior.

Numa fase inicial são apresentados os resultados referentes aos ensaios de caracterização da argamassa, nomeadamente, resistência à compressão, absorção de água por capilaridade e por imersão.

Numa segunda fase são apresentados os resultados obtidos nos ensaios acelerados de imersão/secagem e de imersão por difusão. Os valores apresentados correspondem à média das medições para cada cenário, que correspondem a ensaio de três provetes e a respetiva dispersão é, também, apresentada.

4.2 Caracterização das argamassas

4.2.1 Resultado do ensaio de resistência à compressão

Como referido no capítulo anterior, foram feitos ensaios de resistência à compressão para os 7, 28 e 90 dias, resultados estes demonstrados na Figura 4.1.

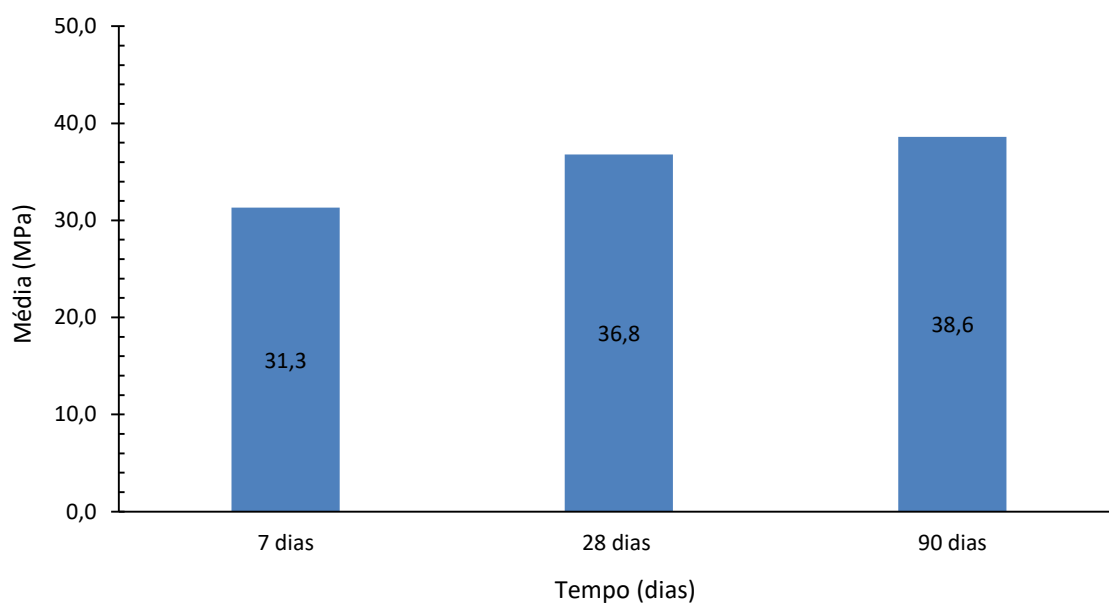


Figura 4.1 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão para 7, 28 e 90 dias.

4.2.2 Resultado do ensaio de absorção de água por capilaridade

A absorção por capilaridade no tempo, t_i , foi calculada, dividindo o aumento da massa $M_i - M_0$ pela área da face inferior do provete que esteve em contacto com a água durante 20 dias, período onde se verificou a saturação dos poros capilares do provete mobilizados durante o ensaio.

A cinética da absorção capilar é apresentada na Figura 4.2 através de uma curva que traduz a variação da quantidade de água absorvida por unidade de superfície da argamassa em contacto com a água, em função da raiz quadrada do tempo. A curva de absorção capilar corresponde aos valores médios, A_{arg} , alcançados através da média do ensaio de três provetes. Pela observação gráfica a curva apresenta um desenvolvimento esperado, com uma maior inclinação na parte inicial da curva, que representa o preenchimento dos poros capilares de maior diâmetro, de seguida um processo mais moroso de preenchimento de capilares mais finos e por último a estabilização da água absorvida causado pelo preenchimento da rede capilar.

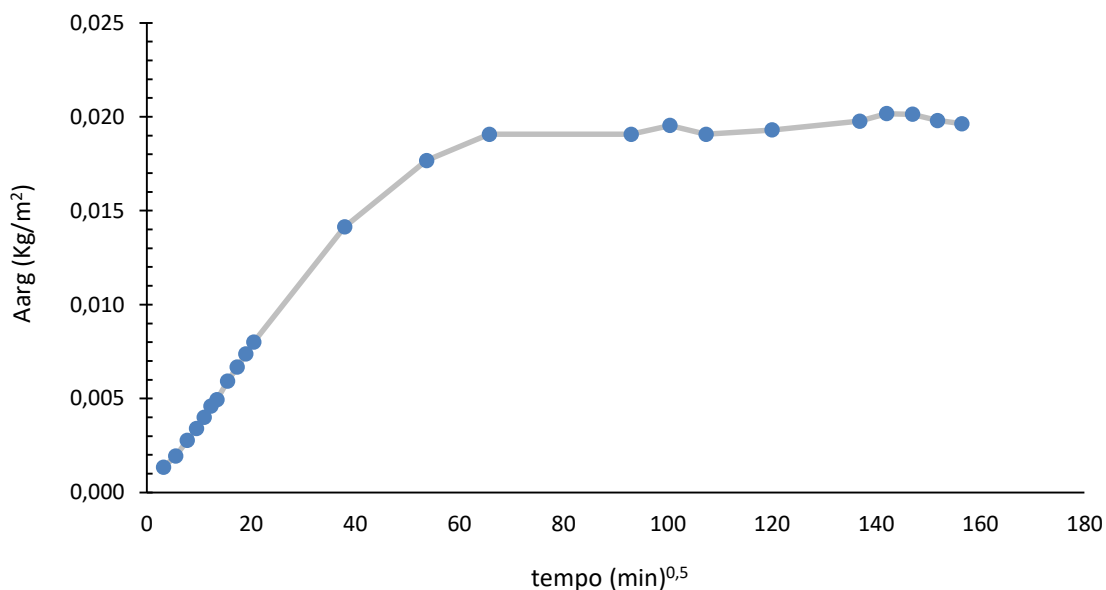


Figura 4.2 - Cinética da absorção capilar do período de ensaio de 20 dias.

Para determinar o coeficiente de absorção capilar, apenas foram consideradas as pesagens das primeiras 4 horas de ensaio da figura 4.2, que permitiu aproximar uma reta aos pontos em causa recorrendo ao método dos mínimos quadráticos, coincidindo o coeficiente de capilaridade com o declive dessa mesma reta (ver Figura 4.3). O período de ensaio fixado

para determinação do coeficiente de absorção capilar, quatro horas, está relacionado com o período de absorção capilar de maior diâmetro, que funcionam como caminhos privilegiados para a penetração de fluídos gasosos e líquidos (Coutinho, 1998).

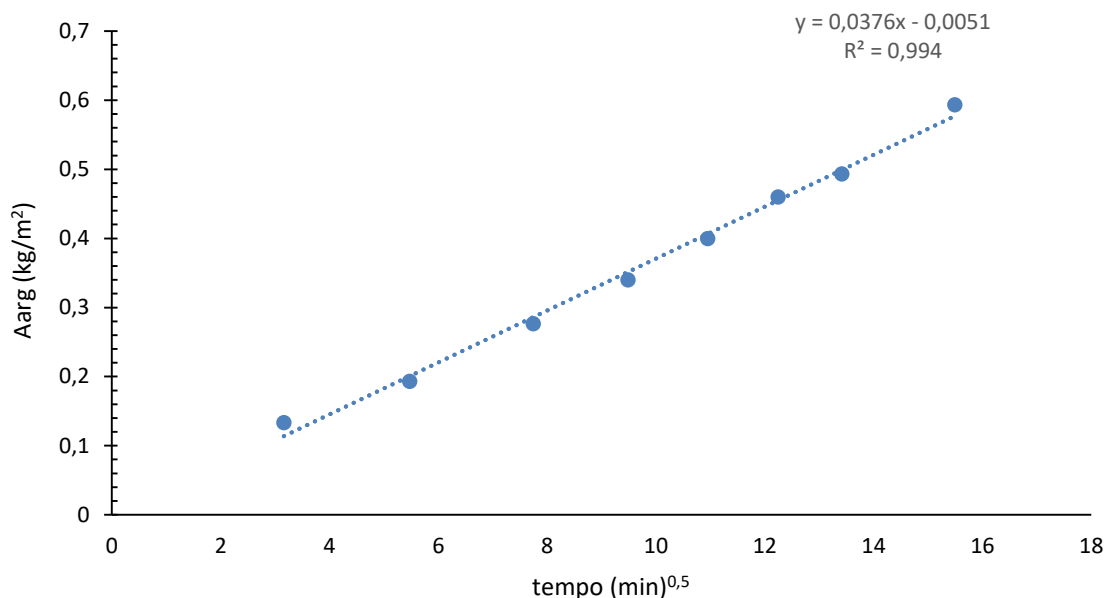


Figura 4.3 - Gráfico de determinação da absorção capilar

Analisando a reta que resulta da dispersão, $y=0,0376x+0,00518$, é possível concluir que a absorção capilar tem um valor de $0,0376 \text{ kg/m}^2/\text{min}^{1/2}$, ou seja, segundo Browne (1991) *apud* Camacho (2015) [1] uma absorção elevada, apesar esta de esta ser uma classificação para betões.

4.2.3 Resultado do ensaio de absorção de água por imersão

O valor de absorção de água por imersão, em percentagem, foi calculado tendo por base a equação (11):

$$A = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100 \quad (11)$$

m_1 – massa do provete saturado ao ar, expressa em gramas;

m_2 – massa hidrostática do provete saturado, expressa em gramas;

m_3 – massa do provete seco, expressa em gramas;

Portanto, o valor da absorção de água por imersão corresponde a 16,85%.

4.3 Ensaios acelerados

4.3.1 Ciclos de imersão e secagem - 7 dias

Os resultados apresentados para todas as situações abaixo representam a média das medições da penetração dos cloretos, medidos em centímetros, com indicação da dispersão dos valores individuais.

Situação A (referência): Para esta situação de 7 dias, foram designados A1, A2 e A3 os três diferentes períodos de molhagem, respetivamente, 2, 3 e 4 dias. A concentração de NaCl é de 3,50%, não apresentando hidróxido de cálcio nem secagem na câmara de carbonatação (Figura 4.4).

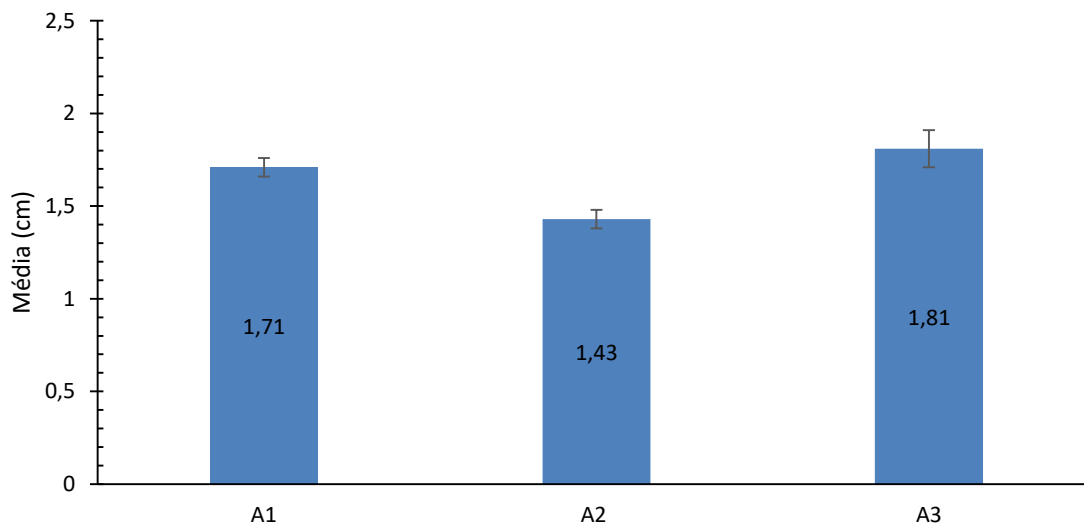


Figura 4.4 - Profundidade de penetração média de cloretos do ensaio de 7 dias para a situação A.

Situação B : Para esta situação de 7 dias, foram designados B1, B2 e B3 os três diferentes períodos de molhagem, respetivamente, 2, 3 e 4 dias. A concentração de NaCl é de 5,00%, não apresentando hidróxido de cálcio nem secagem na câmara de carbonatação (Figura 4.55).

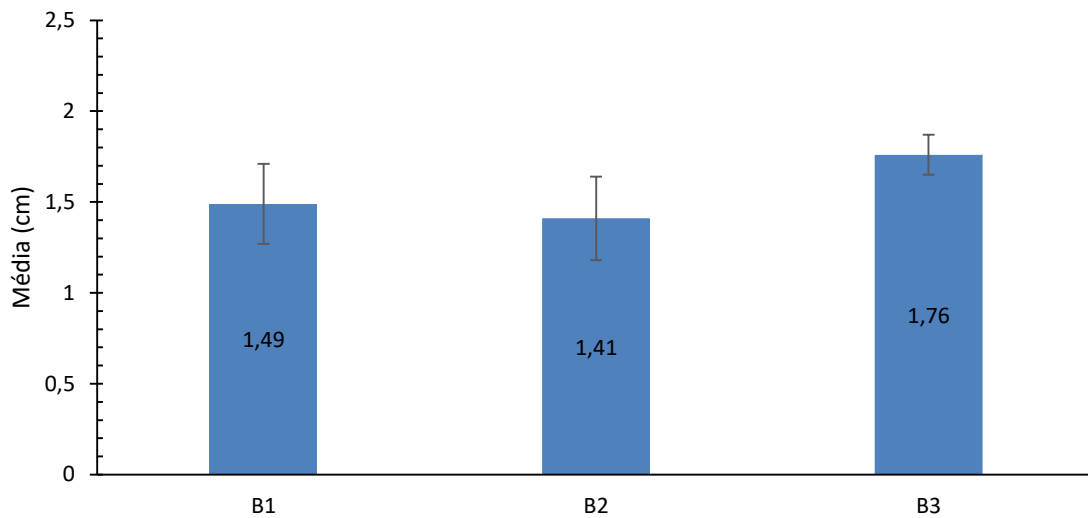


Figura 4.5 - Média de penetração de cloretos do ensaio de 7 dias para a situação B.

Situação C : Para esta situação de 7 dias, foram designados C1, C2 e C3 os três diferentes períodos de molhagem, respetivamente, 2, 3 e 4 dias. A concentração de NaCl é de 10,00%, não apresentando hidróxido de cálcio nem secagem na câmara de carbonatação (Figura 4.6).

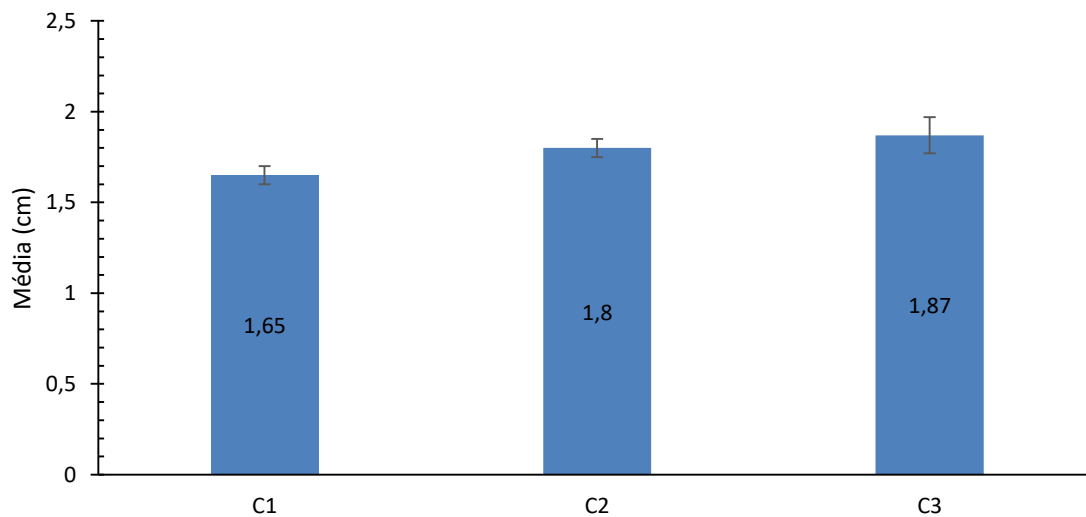


Figura 4.6 - Média de penetração de cloretos do ensaio de 7 dias para a situação C.

Situação D : Para esta situação de 7 dias, foram designados D1, D2 e D3 os três diferentes períodos de molhagem, respetivamente, 2, 3 e 4 dias. A concentração de NaCl é de 3,50%, apresentando hidróxido de cálcio na solução de molhagem e sem secagem na câmara de carbonatação (Figura 4.7).

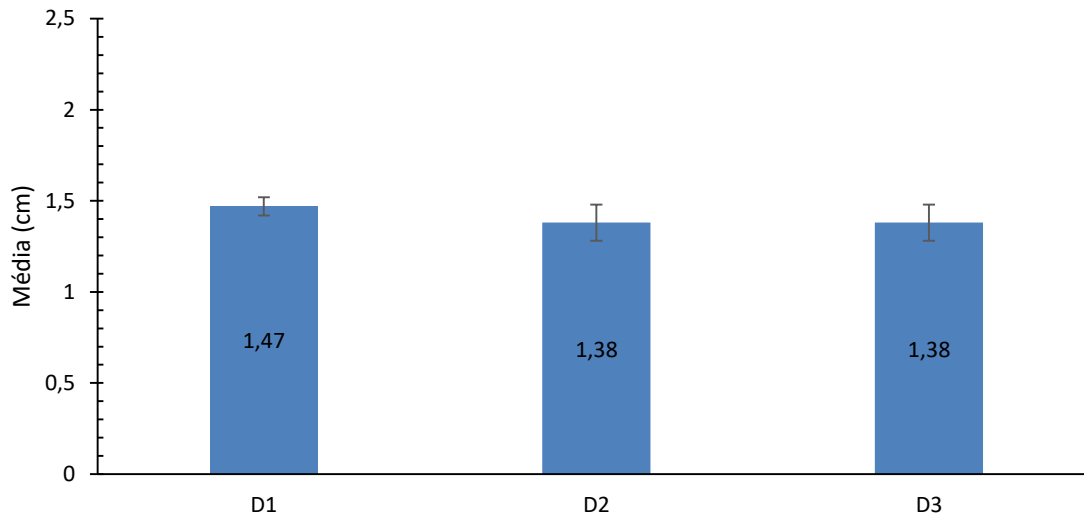


Figura 4.7 - Média de penetração de cloretos do ensaio de 7 dias para a situação D.

Situação E : Para esta situação de 7 dias, foram designados E1, E2 e E3 os três diferentes períodos de molhagem, respetivamente, 2, 3 e 4 dias. A concentração de NaCl é de 3,50%, não apresentando hidróxido de cálcio e com secagem na câmara de carbonatação (Figura 4.8).

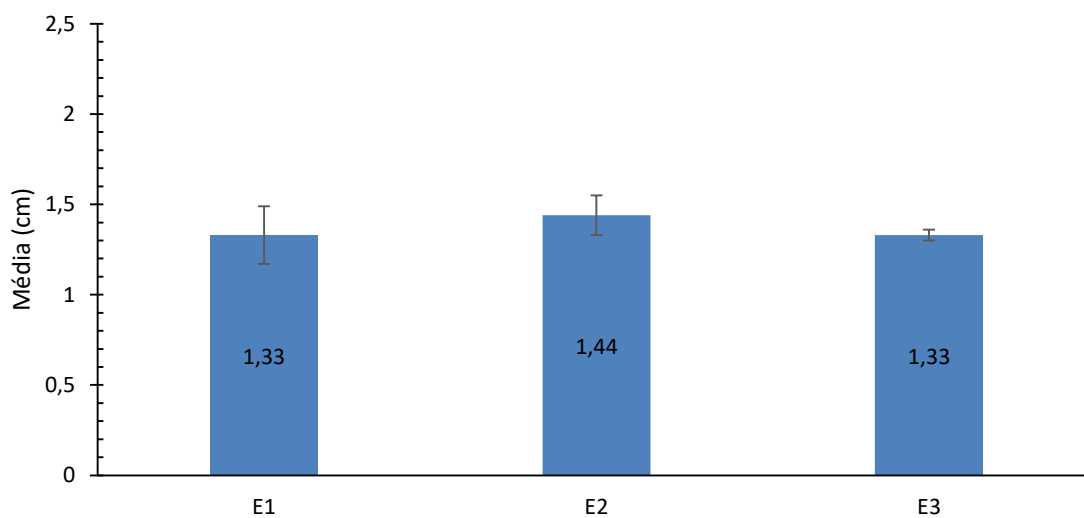


Figura 4.8 - Média de penetração de cloretos do ensaio de 7 dias para a situação E.

Por se estudar paralelamente a carbonatação, foram medidas as médias de penetração que se fixaram em 0,06 cm, 0,07 cm e 0,01 cm para E1, E2 e E3 respectivamente.

4.3.2 Ciclos de imersão e secagem - 14 dias

Os resultados apresentados para todas as situações abaixo representam a média das medições da penetração dos cloretos, medidos em centímetro, bem como a respectiva dispersão de resultados.

Situação A (referência): Para esta situação de 14 dias, foram designados AA, AB e AC os três diferentes períodos de molhagem, respectivamente, 7, 6 e 8 dias. A concentração de NaCl é de 3,50%, não apresentando hidróxido de cálcio nem secagem na câmara de carbonatação (Figura 4.9).

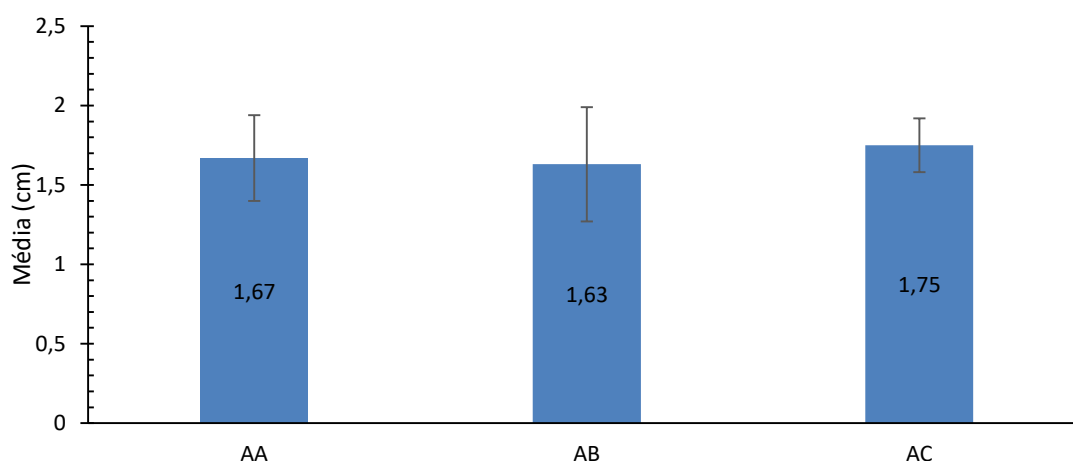


Figura 4.9 - Média de penetração de cloretos do ensaio de 14 dias para a situação A.

Situação B : Para esta situação de 14 dias, foram designados BA, BB e BC os três diferentes períodos de molhagem, respectivamente, 7, 6 e 8 dias. A concentração de NaCl é de 5,00%, não apresentando hidróxido de cálcio nem secagem na câmara de carbonatação (Figura 4.10).

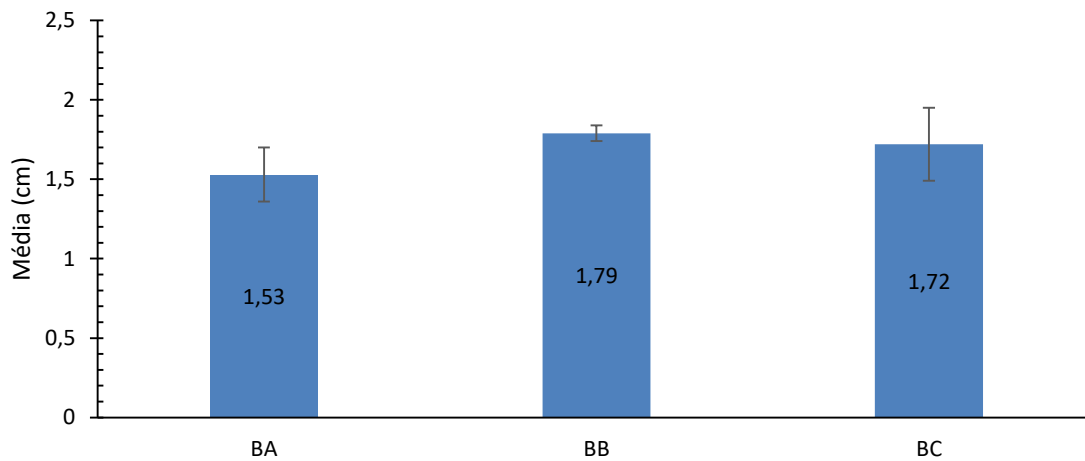


Figura 4.10 - Média de penetração de cloretos do ensaio de 14 dias para a situação B.

Situação C : Para esta situação de 14 dias, foram designados CA, CB e CC os três diferentes períodos de molhagem respetivamente, 7, 6 e 8 dias. A concentração de NaCl é de 10,00%, não apresentando hidróxido de cálcio nem secagem na câmara de carbonatação (Figura 4.11).

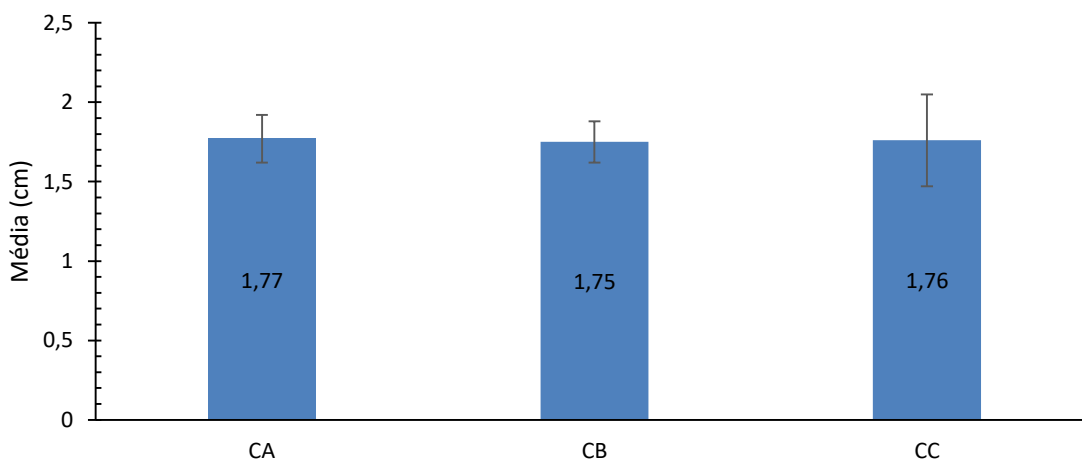


Figura 4.11 - Média de penetração de cloretos do ensaio de 14 dias para a situação C.

Situação D : Para esta situação de 14 dias, foram designados DA, DB e DC os três diferentes períodos de molhagem e secagem. A concentração de NaCl é de 3,50%, apresentando

hidróxido de cálcio na solução de molhagem e sem secagem na câmara de carbonatação (Figura 4.12).

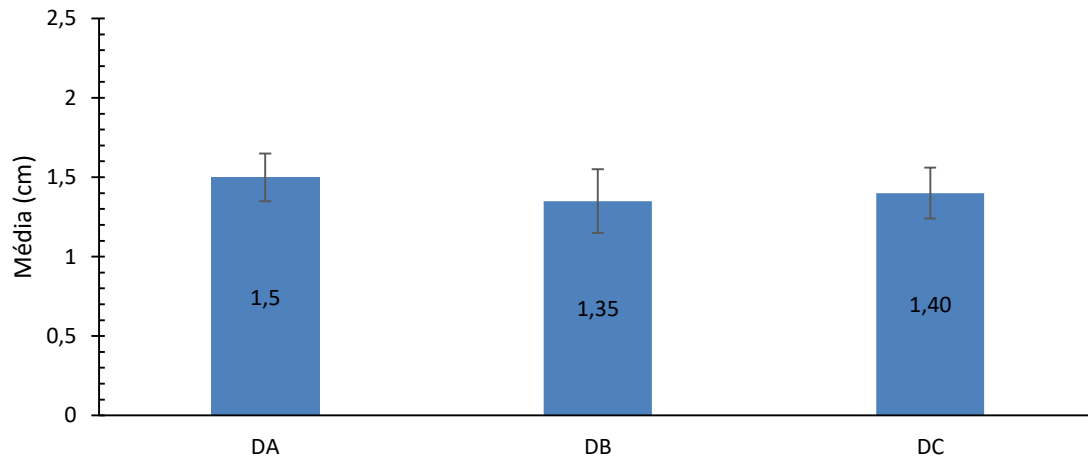


Figura 4.12 - Média de penetração de cloretos do ensaio de 14 dias para a situação D.

Situação E : Para esta situação de 14 dias, foram designados EA, EB e EC os três diferentes períodos de molhagem e secagem. A concentração de NaCl é de 3,50%, não apresentando hidróxido de cálcio e com secagem na câmara de carbonatação (Figura 4.13).

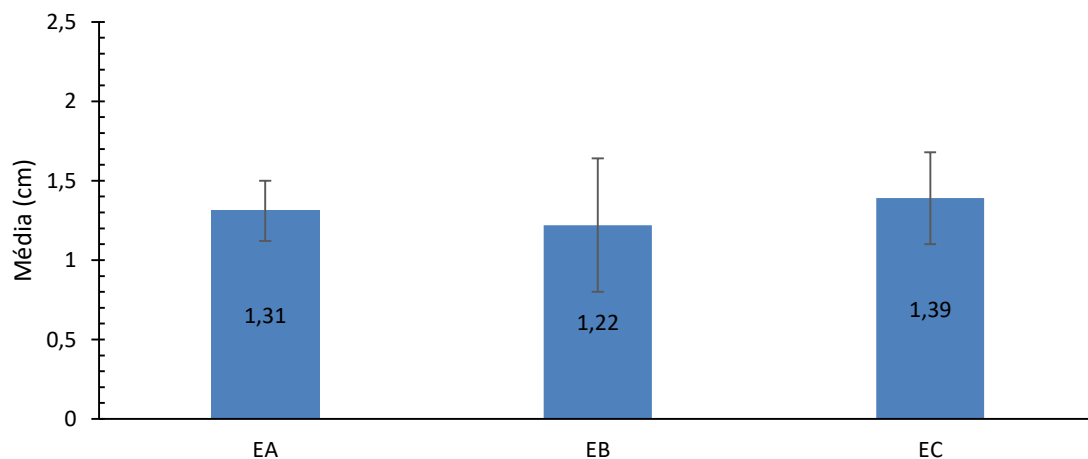


Figura 4.13 - Média de penetração de cloretos do ensaio de 14 dias para a situação E.

Por se estudar paralelamente a carbonatação, foram medidas as médias de penetração que se fixaram em 0,2 cm, 0,14 cm e 0,00 cm para EA, EB e EC respectivamente.

4.3.3 Imersão por difusão - 60 dias

Situação A (referência): A situação de imersão por difusão em 60 dias foi designada de AD. A concentração de NaCl é de 3,50%, não apresentando hidróxido de cálcio. Os resultados são apresentados na Figura 4.14.

Situação B: A situação de imersão por difusão em 60 dias foi designada de BD. A concentração de NaCl é de 5,00%, não apresentando hidróxido de cálcio. Os resultados são apresentados na Figura 4.14.

Situação C: A situação de imersão por difusão em 60 dias foi designada de CD. A concentração de NaCl é de 10,00%, não apresentando hidróxido de cálcio. Os resultados são apresentados na Figura 4.14.

Situação D: A situação de imersão por difusão em 60 dias foi designada de DD. A concentração de NaCl é de 3,50%, com presença de hidróxido de cálcio na solução de molhagem. Os resultados são apresentados na Figura 4.14.

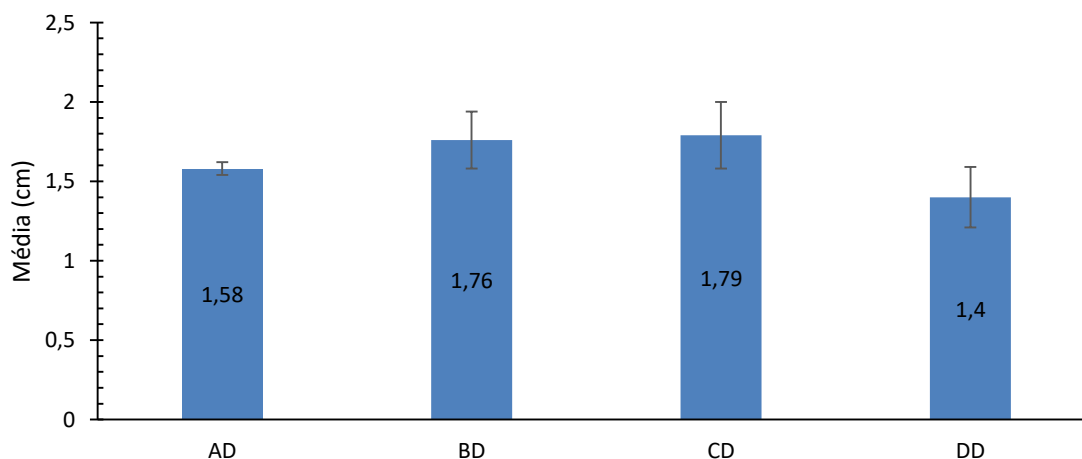


Figura 4.14 - Médias de penetração de cloretos do ensaio de difusão de 60 dias para a situação AD, BD, CD e DD.

Os resultados apresentados para todas as situações acima representam a média das medições da penetração dos cloretos, medidos em centímetro, sendo, também, apresentada a respectiva dispersão de resultados.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são analisados todos os resultados obtidos durante a fase experimental do trabalho.

5.1 Influência do teor de NaCl na solução de molhagem sobre a penetração de cloretos

Neste subcapítulo é avaliada a forma como o teor de NaCl pode influenciar a penetração de cloretos na fase de molhagem. A comparação é feita segundo os mesmos dias de molhagem, com as diferentes concentrações de NaCl.

5.1.1 Ciclos curtos – 7 dias

2 dias de molhagem e 5 dias de secagem: estão inseridas as situações A1, B1 e C1 onde é possível observar, através da Figura 5.1, que para uma concentração de 3,5% de NaCl (A1) temos uma média de penetração de 1,71 cm, para uma concentração de 5% de NaCl (B1) temos uma média de penetração de 1,49 cm e, por último, para uma solução com concentração de 10% de NaCl (C1) temos uma média de penetração de 1,65 cm. Com base nos resultados é possível verificar que não existe grande variação na penetração de cloretos, com uma linha de tendência (tracejado) bastante linear indicando uma baixa dispersão de valores, pelo que para este período de ensaio (2 meses), a percentagem de NaCl parece não ter uma influência significativa quando se utilizam apenas 2 dias de molhagem. O desvio padrão aparenta dispersão reduzida, com um coeficiente de dispersão nunca superior a 19%, o que reforça a afirmação acima.

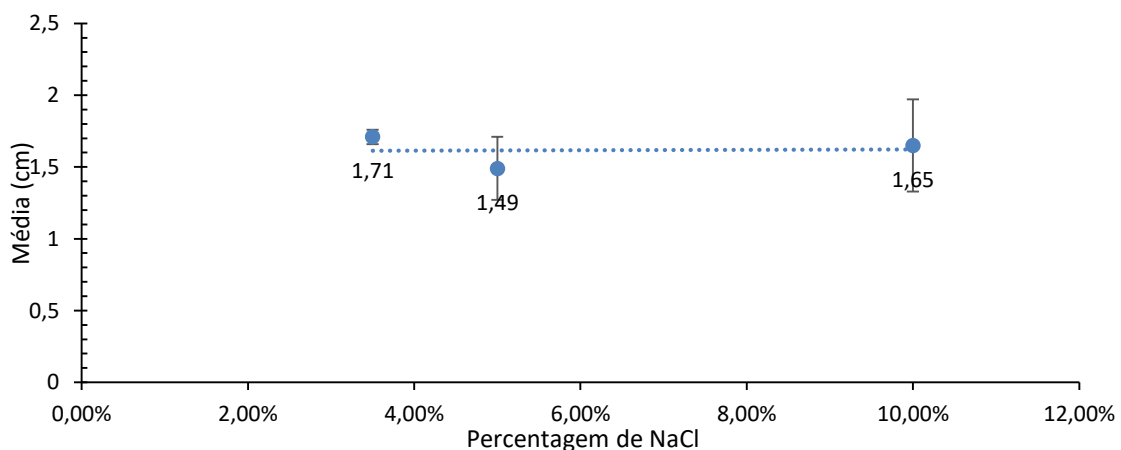


Figura 5.1 - Média de penetração de cloretos para as situações de dois dias de molhagem e cinco de secagem com 3,5%, 5% e 10% de NaCl, A1, B1 e C1, respetivamente.

3 dias de molhagem e 4 dias de secagem: estão inseridas as situações A2, B2 e C2 onde é possível observar, através da Figura 5.2, que para uma concentração de 3,5% de NaCl (A2) temos uma média de penetração de 1,43 cm, para uma concentração de 5% de NaCl (B2) temos uma média de penetração de 1,41 cm e, por último, para uma solução de 10% de NaCl (C2) temos uma média de penetração de 1,80 cm. Comparando os valores de penetração de cloretos apresentados em A2 e B2 percebe-se que, para 3 dias de molhagem, não há alteração significativa nos valores da penetração. No entanto, comparando os valores obtidos em A2 e C2, observa-se um acréscimo aproximado de 21% com o aumento do teor de NaCl, o que indicia já alguma influência da percentagem de NaCl na solução de imersão sobre a profundidade de penetração de cloretos atingida. Este aumento também pode ser observado pela linha de tendência (tracejada) que aumenta paralelamente à concentração de NaCl. Tal fato vai ao encontro dos resultados alcançados por Bioubakhsh (2011) [45] que estudou ciclos de imersão e secagem para 3%, 10% e 50% NaCl na solução de imersão, concluindo uma maior penetração de cloretos proporcional ao aumento do teor de NaCl na solução.

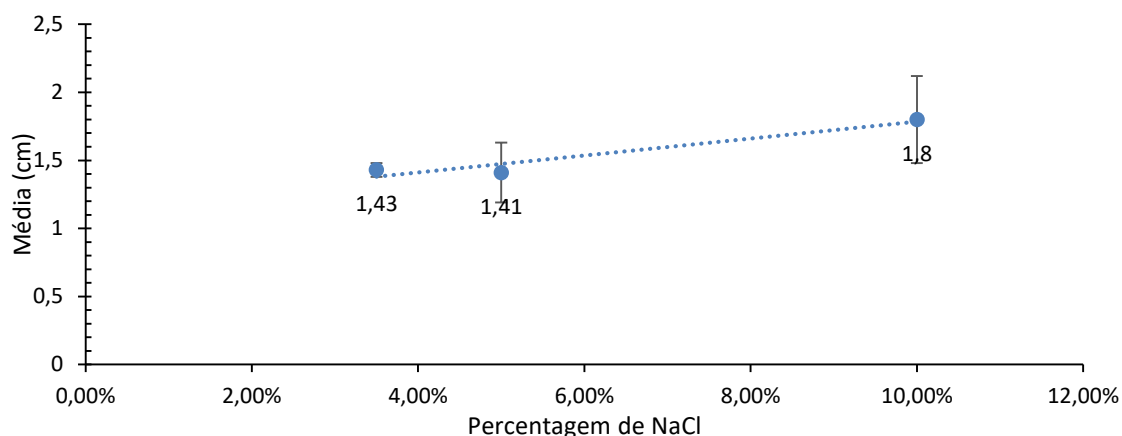


Figura 5.2 - Média de penetração de cloretos para as situações de três dias de molhagem e quatro de secagem com 3,5%, 5% e 10% de NaCl, A2, B2 e C2, respetivamente.

4 dias de molhagem e 3 dias de secagem: estão inseridas as situações A3, B3 e C3 onde é possível observar, através da Figura 5.3, que para uma concentração de 3,5% de NaCl (A3) temos uma média de penetração de 1,81 cm, para uma concentração de 5% de NaCl (B3) temos uma média de penetração de 1,76 cm e por último para uma solução de 10% de NaCl (C3) temos uma média de penetração de 1,87 cm. Neste caso, assim como no anterior, não há alteração significativa nos valores de penetração quando se compara os valores alcançados em A3 e B3. Já quando se compara os valores obtidos em A3 e C3 é possível observar um ligeiro

acréscimo de penetração de cloretos paralelo ao aumento da percentagem de NaCl, aproximadamente 3%, no entanto, como a diferença é pouco significativa não é possível concluir se existiu, ou não, grande influência do teor de NaCl.

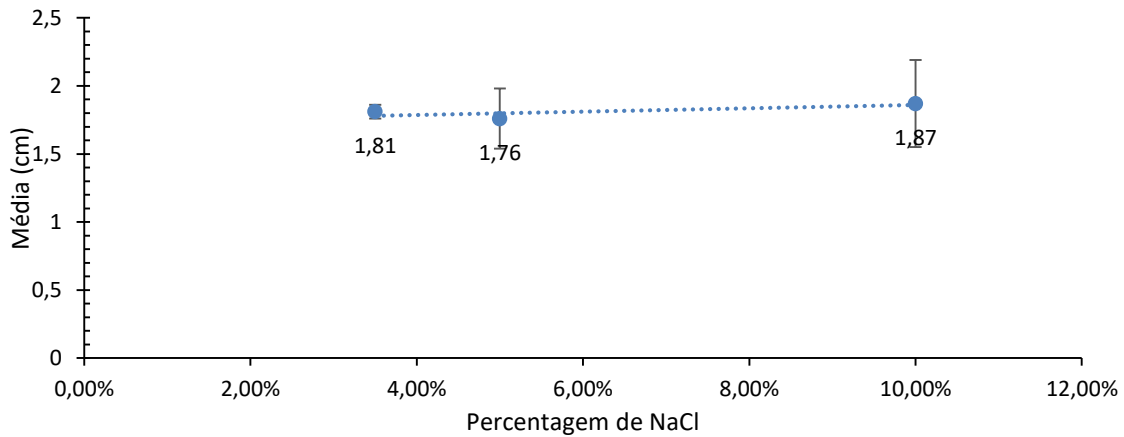


Figura 5.3 - Média de penetração de cloretos para as situações de quatro dias de molhagem e três de secagem com 3,5%, 5% e 10% de NaCl, A3, B3 e C3, respetivamente.

Apresentados os resultados para os ciclos de 7 dias, pode-se dizer que, no geral, para as condições estudadas, parece existir uma "situação de equilíbrio" ao se optar por três dias de molhagem e quatro dias de secagem. Os resultados indicam que o teor de NaCl não afeta significativamente a profundidade de cloretos penetrados, apesar de se ter notado uma ligeira tendência para o aumento da profundidade com o aumento do teor de NaCl.

5.1.2 Ciclos longos – 14 dias

7 dias de molhagem e 7 dias de secagem: estão inseridas as situações AA, BA e CA onde é possível observar, através da Figura 5.4, que para uma concentração de 3,5% de NaCl (AA) temos uma média de penetração de 1,67 cm, para uma concentração de 5% de NaCl (BA) temos uma média de penetração de 1,53 cm e por último para uma solução de 10% de NaCl (CA) temos uma média de penetração de 1,77 cm. Com base na observação do gráfico é possível averiguar que não existe uma grande variação na penetração de cloretos, apesar de existir uma pequena tendência de aumento da profundidade de penetração com o acréscimo da concentração de NaCl, mas abrangendo valores muito pouco significativos. A linha de tendência (tracejado) aponta para esse pequeno aumento, contudo com um declive muito baixo, não permitindo alcançar corretas conclusões.

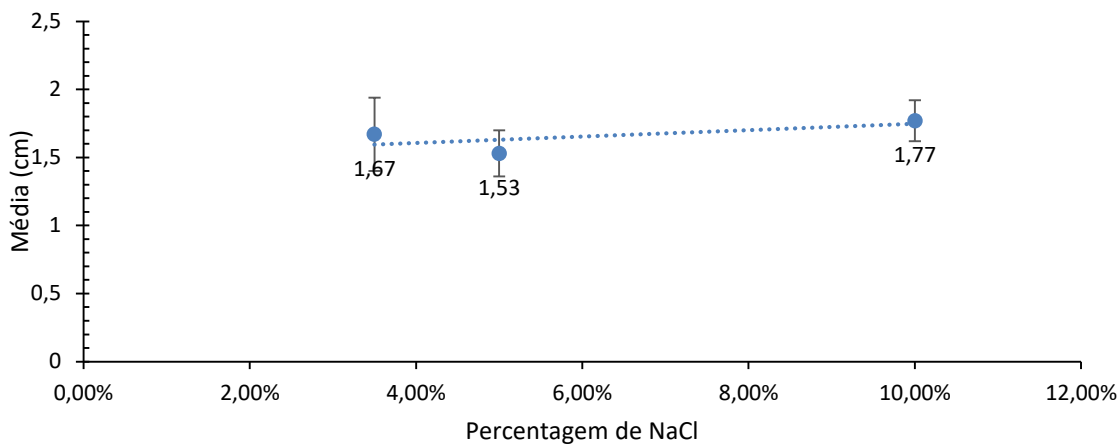


Figura 5.4 - Média de penetração de cloretos para as situações de sete dias de molhagem e sete de secagem com 3,5%, 5% e 10% de NaCl, AA, BA e CA, respetivamente.

6 dias de molhagem e 8 dias de secagem: estão inseridas as situações AB, BB e CB onde é possível observar, através da Figura 5.5, que para uma concentração de 3,5% de NaCl (AB) temos uma média de penetração de 1,63 cm, para uma concentração de 5% de NaCl (BB) temos uma média de penetração de 1,79 cm e por último para uma solução de 10% de NaCl (CB) temos uma média de penetração de 1,75 cm. Pela análise do gráfico, observa-se uma evolução aproximadamente linear, com um muito ligeiro aumento conforme também aumenta a percentagem de NaCl. O desvio padrão neste caso, apesar de a situação AA apresentar um coeficiente de dispersão de 22%, as restantes têm valores inferiores a 16%, que demonstra uma dispersão reduzida.

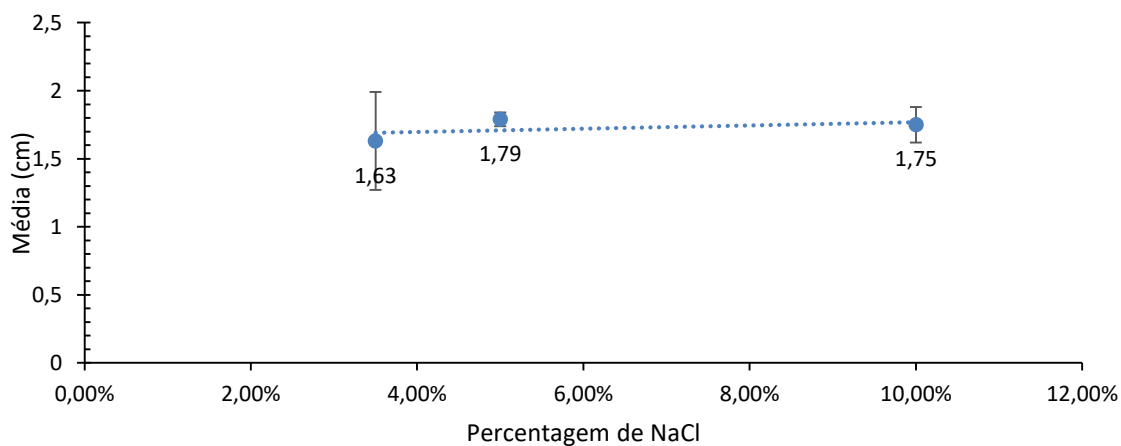


Figura 5.5 - Média de penetração de cloretos para as situações de sete dias de molhagem e sete de secagem com 3,5%, 5% e 10% de NaCl, AB, BB e CB, respetivamente.

8 dias de molhagem e 6 dias de secagem: estão inseridas as situações AC, BC e CC onde é possível observar através da Figura 5.6, que para uma concentração de 3,5% de NaCl (AC) temos uma média de penetração de 1,75 cm, para uma concentração de 5% de NaCl (BC) temos uma média de penetração de 1,72 cm e por último para uma solução de 10% de NaCl (CC) temos uma média de penetração de 1,76 cm. Neste caso, onde o período de molhagem é superior ao de secagem, o gráfico mostra valores de penetração bastante semelhantes, pelo que aparenta ser nula, neste caso, a influência do teor de NaCl na solução de molhagem. Para comprovar este facto, é possível visualizar uma linha de tendência com declive praticamente nulo.

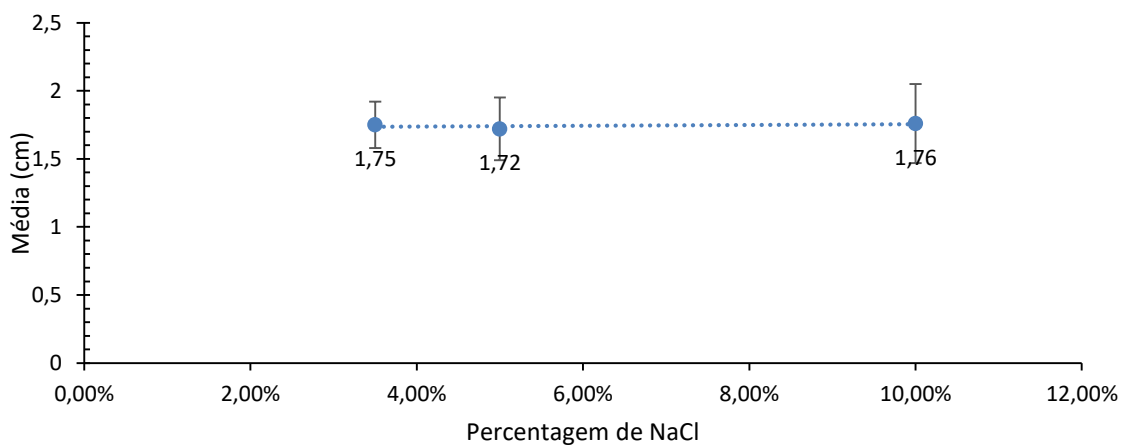


Figura 5.6 - Média de penetração de cloretos para as situações de oito dias de molhagem e seis de secagem com 3,5%, 5% e 10% de NaCl, AC, BC e CC, respetivamente.

Apresentados os resultados para os ciclos de 14 dias, pode-se dizer que o aumento do teor de NaCl na solução de imersão parece não influir na profundidade de penetração de cloretos.

5.1.3 Imersão – 60 dias

Relativamente ao ensaio de imersão, é possível observar pela Figura 5.7 que para uma concentração de 3,5% de NaCl (AD) temos uma média de penetração de 1,58 cm, para uma concentração de 5% de NaCl (BD) temos uma média de penetração de 1,76 cm e por último para uma solução de 10% de NaCl (CD) temos uma média de penetração de 1,79 cm. Por observação gráfica, nota-se um aumento proporcional na penetração de cloretos com o aumento da concentração de NaCl. Comparando os valores obtidos em AD e CD, observa-se um acréscimo aproximado de 12% com o aumento do teor de NaCl, o que indicia já alguma influência da percentagem de NaCl na solução de imersão sobre a profundidade de penetração

de cloretos atingida. Malheiro (2008) [6] realizou o ensaio durante 49 dias, com 3% de NaCl e razão a/l de 0,55, utilizando argamassa e alcançou uma penetração de cerca de 2,0 cm. Camacho (2015) [1] também realizou este ensaio, utilizando uma argamassa com relação a/l igual a 0,38, no entanto num período de 4 meses, com uma concentração de 5% de NaCl, tendo valores de cerca de 2,2 cm, confirmando um aumento pouco significativo de penetração de cloretos com o dobro do tempo de imersão.

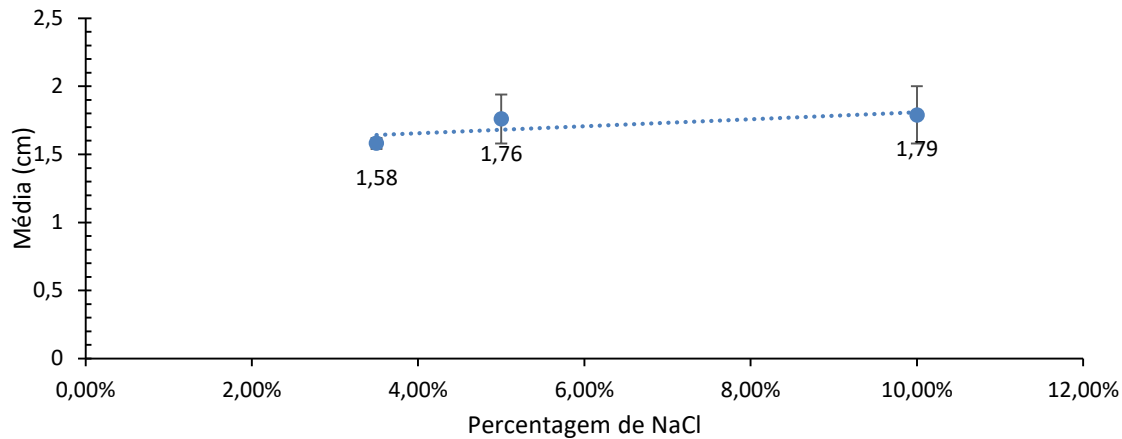


Figura 5.7 - Média de penetração de cloretos para a situação de imersão com 3,5%, 5% e 10% de NaCl, AC, BC e CC, respetivamente.

Com base nos resultados obtidos, pode-se dizer que, para as condições estudadas, o aumento do teor de NaCl na solução de imersão, não altera de maneira expressiva a profundidade de penetração de cloretos na argamassa. Nos ensaios cíclicos, tanto nos curtos quanto nos longos, não se verifica uma relação clara entre o aumento no teor de NaCl e o aumento na profundidade de penetração. Ao contrário, apesar de subtil, provavelmente por causa do curto período total de ensaio, nos provetes submetidos ao ensaio de imersão por 60 dias, observa-se uma tendência de aumento na profundidade de penetração de cloretos com o aumento do teor de NaCl na solução.

5.2 Influência da presença de hidróxido de cálcio na solução de molhagem sobre a penetração de cloretos

De forma a avaliar de que forma o hidróxido de cálcio pode influenciar a penetração de cloretos foram comparadas as médias de penetração para os mesmos dias de molhagem entre a situação D (com presença de hidróxido de cálcio e com 3,5% de NaCl) e a situação A (com 3,5% de NaCl).

5.2.1 Ciclos curtos – 7 dias

2 dias de molhagem e 5 dias de secagem: estão inseridas as situações A1 e D1 onde é possível observar pela Figura 5.8, que para a situação sem hidróxido de cálcio e 3,5% de NaCl (A1) temos uma média de penetração de 1,71 cm e para a situação com hidróxido de cálcio e 3,5% de NaCl (D1) temos uma média de penetração de 1,47 cm, o que leva a concluir que, embora exista uma ligeira diferença, para este caso a presença de hidróxido de cálcio na água retardou a penetração de cloretos.

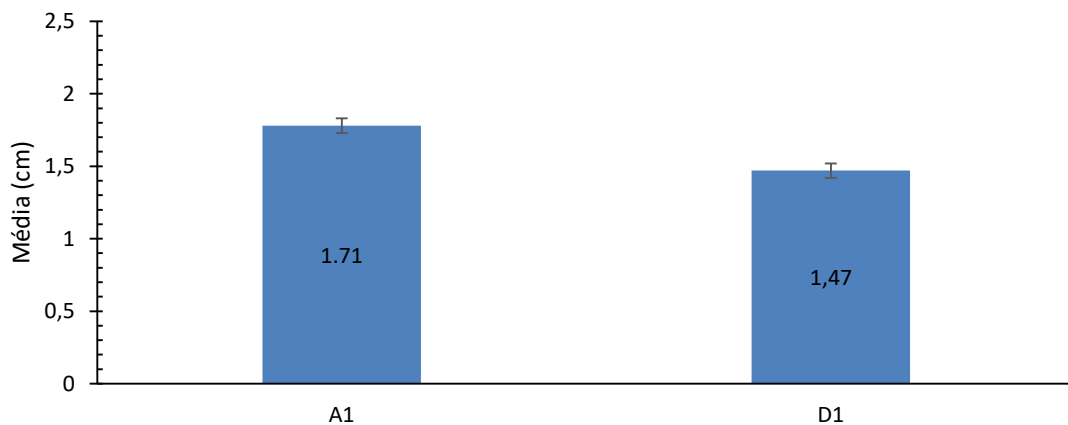


Figura 5.8 - Média de penetração da situação A1 e D1 em cm.

3 dias de molhagem e 4 dias de secagem: estão inseridas as situações A2 e D2 onde é possível observar pela Figura 5.9, que para a situação sem hidróxido de cálcio e 3,5% de NaCl (A2) temos uma média de penetração de 1,43 cm e para a situação com hidróxido de cálcio e 3,5% de NaCl (D2) temos uma média de penetração de 1,38 cm, o que leva a concluir que, embora exista uma ligeira diferença, para este caso a presença de hidróxido de cálcio na água retardou a penetração de cloretos, o que leva a concluir que tal como no anterior, a presença do

hidróxido de cálcio retardou a penetração de cloretos. Esta diferença no valor de penetração tem valores muito semelhantes, talvez devido ao facto de período de ensaio ter sido tão curto.

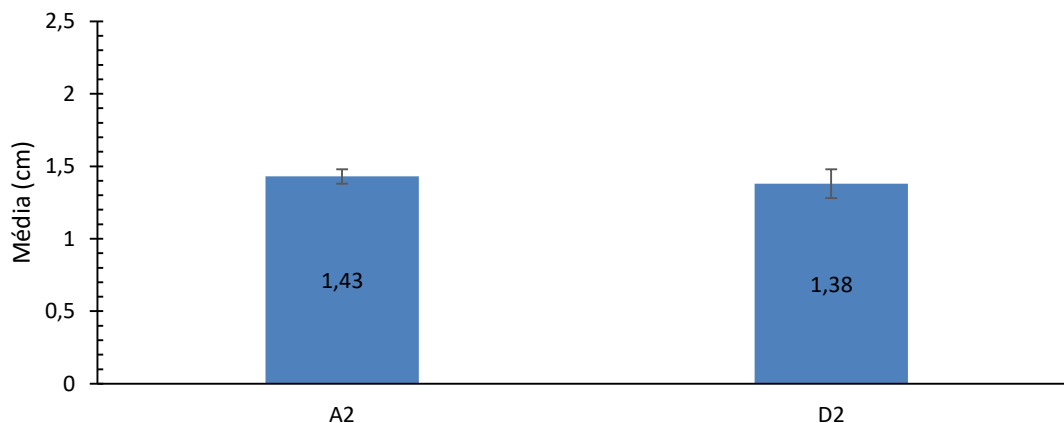


Figura 5.9 - Média de penetração da situação A2 e D2 em cm.

4 dias de molhagem e 3 dias de secagem: estão inseridas as situações A3 e D3 onde é possível observar pela Figura 5.10, que para a situação sem hidróxido de cálcio e 3,5% de NaCl (A3) temos uma média de penetração de 1,91 cm e para a situação com hidróxido de cálcio e 3,5% de NaCl (D3) temos uma média de penetração de 1,38 cm, o que leva a concluir que tal como nos anteriores, a presença do hidróxido de cálcio retardou a penetração de cloretos.

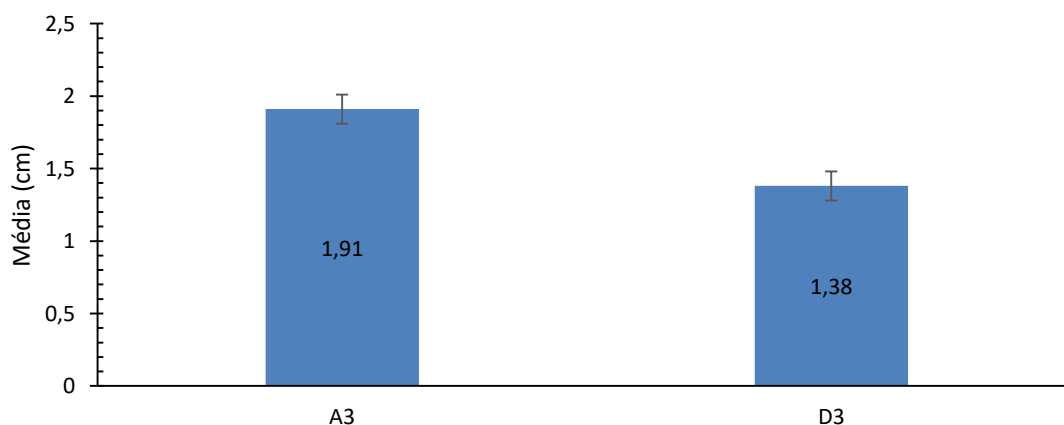


Figura 5.10 - Média de penetração da situação A3 e D3 em cm.

5.2.2 Ciclos longos – 14 dias

7 dias de molhagem e 7 dias de secagem: estão inseridas as situações AA e DA onde é possível observar pela Figura 5.11 que para a situação sem hidróxido de cálcio e 3,5% de NaCl (AA) temos uma média de penetração de 1,67 cm e para a situação com hidróxido de cálcio e 3,5% de NaCl (DA) temos uma média de penetração de 1,50 cm, o que leva a concluir que para este caso a presença de hidróxido de cálcio na água retardou a penetração de cloretos.

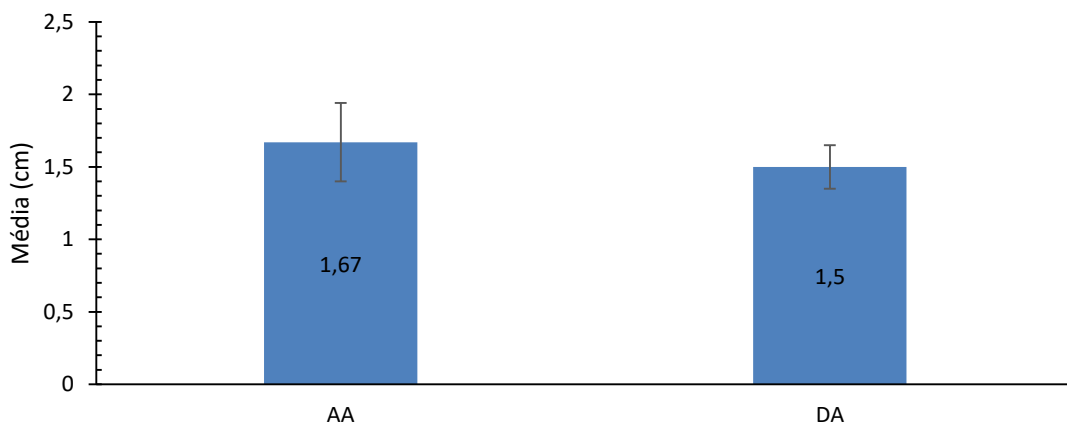


Figura 5.11 - Média de penetração da situação AA e DA em cm.

6 dias de molhagem e 8 dias de secagem: estão inseridas as situações AB e DB onde é possível observar pela Figura 5.12 que para a situação sem hidróxido de cálcio e 3,5% de NaCl (AB) temos uma média de penetração de 1,63 cm e para a situação com hidróxido de cálcio e 3,5% de NaCl (DB) temos uma média de penetração de 1,35 cm, o que leva a concluir que tal como no anterior, a presença do hidróxido de cálcio retardou a penetração de cloretos.

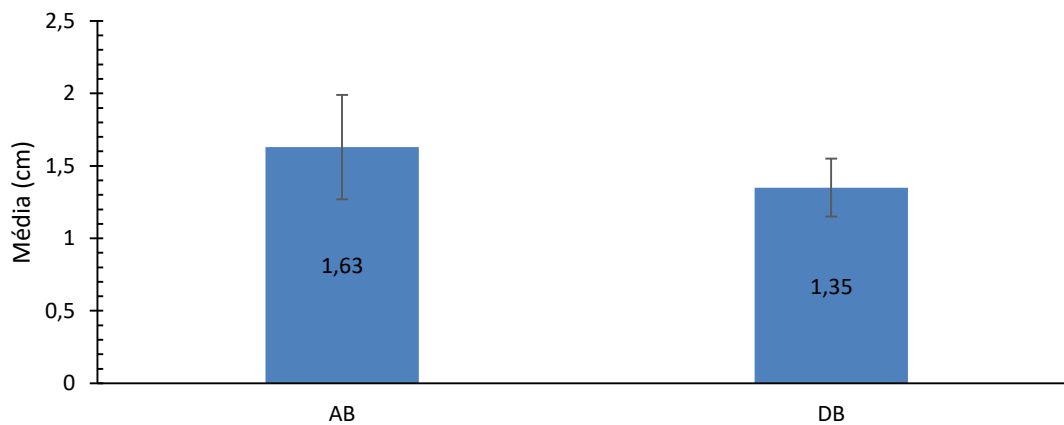


Figura 5.12 - Média de penetração da situação AB e DB em cm.

86 dias de molhagem e 6 dias de secagem: estão inseridas as situações AC e DCB onde é possível observar pela Figura 5.13 que para a situação sem hidróxido de cálcio e 3,5% de NaCl (AC) temos uma média de penetração de 1,75 cm e para a situação com hidróxido de cálcio e 3,5% de NaCl (DC) temos uma média de penetração de 1,40 cm, o que leva a concluir que tal como nos anteriores, a presença do hidróxido de cálcio retardou a penetração de cloretos.

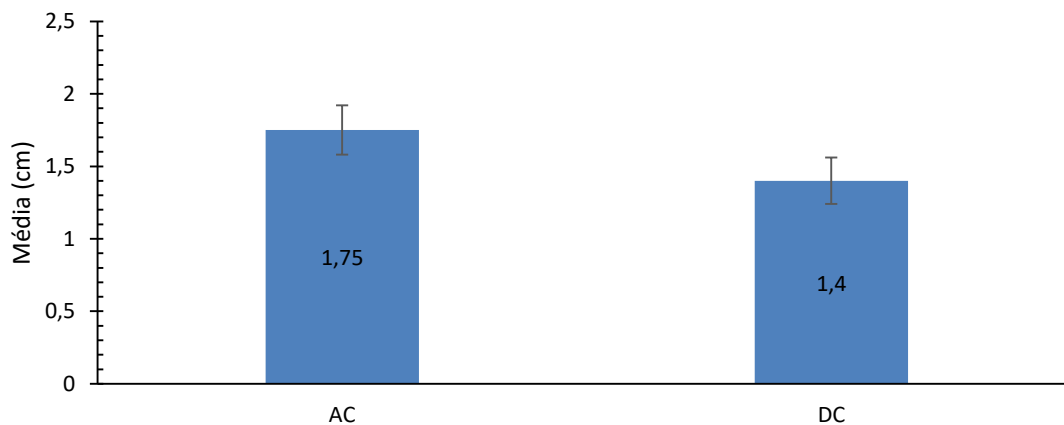
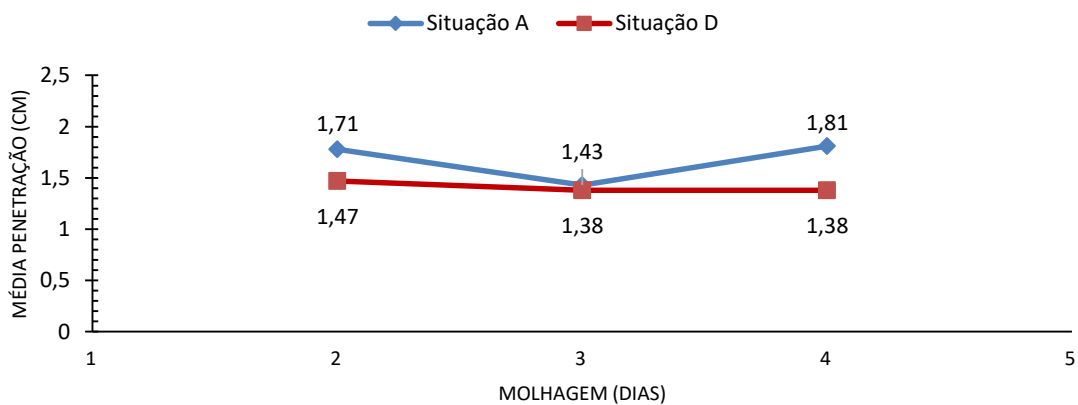


Figura 5.13 - Média de penetração da situação AC e DC em cm.

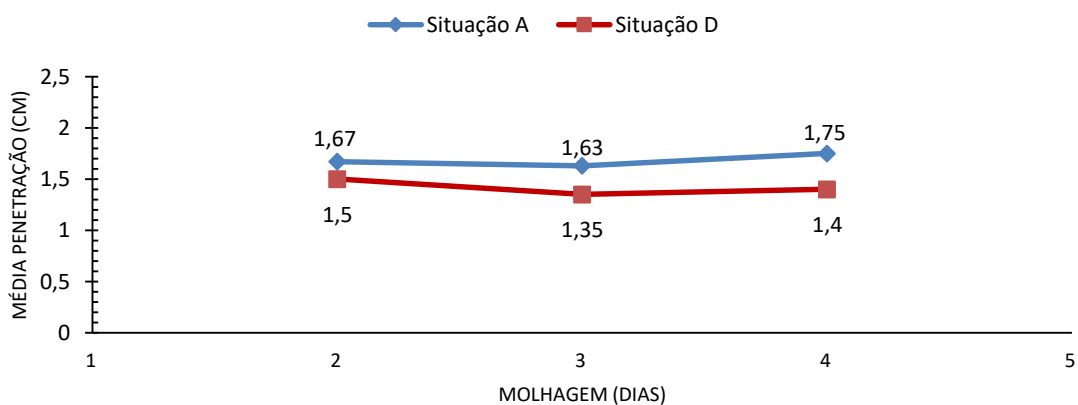
De uma maneira geral e analisando a situação A e D para os ciclos de sete e catorze dias, presentes na Figura 5.14a e Figura 5.14b, respetivamente, é possível observar que a presença de hidróxido de cálcio (situação D) parece ter retardado a entrada de cloretos. Para a primeira

figura, podemos observar que para a situação de 7 dias, notam-se menores valores de penetração para a situação D (linha vermelha) relativamente à situação A (linha azul) sem presença de hidróxido de cálcio na solução de molhagem para os três diferentes ciclos de molhagem e secagem, com diferenças a variar entre 5% e 25%.

Na segunda figura é possível observar mais uma vez que a situação D (linha vermelha) com presença de hidróxido de cálcio na solução de molhagem tem valores de penetração inferiores à situação A (linha azul) para os três diferentes ciclos de 14 dias, com diferenças a variar entre 10% e 20%. No entanto, o ciclo total de dois meses acaba por ser curto para retirar ilações com mais certezas.



a)



b)

Figura 5.14 - Média de penetração para as situações A e D.

De um modo geral, a presença de hidróxido de cálcio retardou a penetração de cloretos. No entanto, estão a ser consideradas conclusões para um ciclo curto, não sendo possível afirmar qual o efeito num período de tempo mais longo.

5.3 Influência da presença de CO₂ no ambiente de secagem sobre a penetração de cloretos

De forma a avaliar de que forma a secagem em câmara de carbonatação pode influenciar a penetração de cloretos foram comparadas as médias de penetração para os mesmos dias de molhagem e para os mesmos dias de secagem com a distinção entre a secagem em câmara de carbonatação (situação E com 3,5% de NaCl) e a secagem natural (situação A com 3,5% de NaCl).

5.3.1 Ciclos curtos – 7 dias

2 dias de molhagem e 5 dias de secagem: estão inseridas as situações A1 e E1 onde é possível observar pela Figura 5.15 que para a situação sem secagem em câmara de carbonatação e 3,5% de NaCl (A1) temos uma média de penetração de 1,71 cm e para a situação com secagem em câmara de carbonatação e 3,5% de NaCl (E1) temos uma média de penetração de 1,33 cm, o que leva a concluir que para este caso a secagem na câmara de carbonatação fez com que retardasse a penetração de cloretos, embora com uma diferença de valores muito curtas. Malheiro *et al.* (2014) [4] realizou um estudo idêntico com presença de carbono na fase de secagem, com um período total de ciclos de imersão e secagem de 56 dias, alcançando a mesma conclusão. No caso teve uma penetração de cerca de 1,5 cm para a situação de secagem em câmara de carbonatação e 2 cm para a secagem natural, estando em sintonia com os resultados obtidos neste estudo.

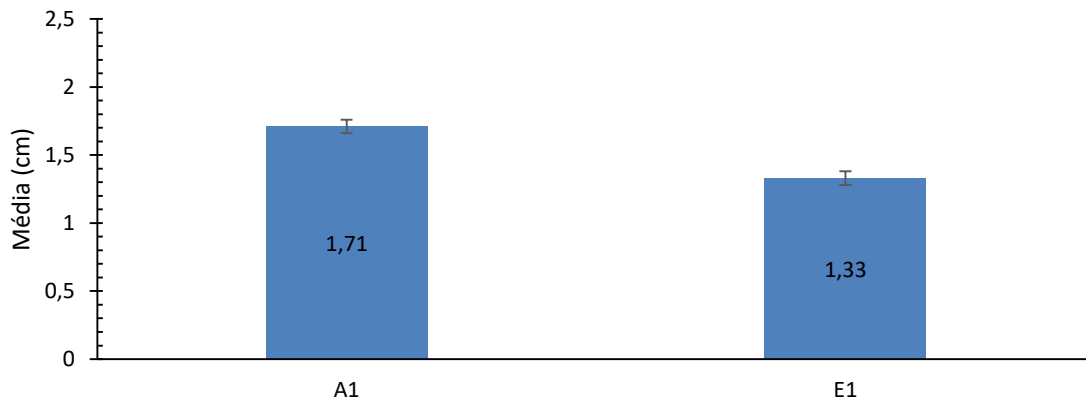


Figura 5.15 - Média de penetração da situação A1 e E1 em cm.

3 dias de molhagem e 4 dias de secagem: estão inseridas as situações A2 e E2 onde é possível observar pela Figura 5.16 que para a situação sem secagem em câmara de carbonatação e 3,5% de NaCl (A2) temos uma média de penetração de 1,43 cm e para a situação com secagem em câmara de carbonatação e 3,5% de NaCl (E2) temos uma média de penetração de 1,44 cm. Devido à proximidade dos valores não é possível chegar a uma conclusão acerca da influência da carbonatação no período de secagem, sendo necessário para tal o alargamento do período de ensaio.

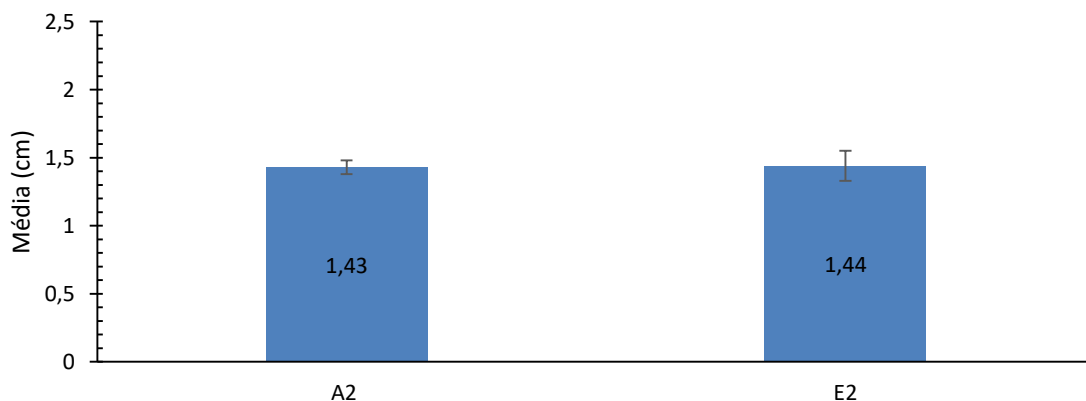


Figura 5.16 - Média de penetração da situação A2 e E2 em cm.

4 dias de molhagem e 3 dias de secagem: estão inseridas as situações A3 e E3 onde é possível observar pela Figura 5.17 que para a situação sem secagem em câmara de carbonatação e

3,5% de NaCl (A3) temos uma média de penetração de 1,81 cm e para a situação com secagem em câmara de carbonatação e 3,5% de NaCl (E3) temos uma média de penetração de 1,33 cm, o que leva a concluir que para este caso a secagem na câmara de carbonatação fez com que retardasse a penetração de cloretos.

Apesar da diferença não ser muito acentuada, nota-se um ligeiro acréscimo na penetração de cloretos para a situação de secagem ao ar livre.

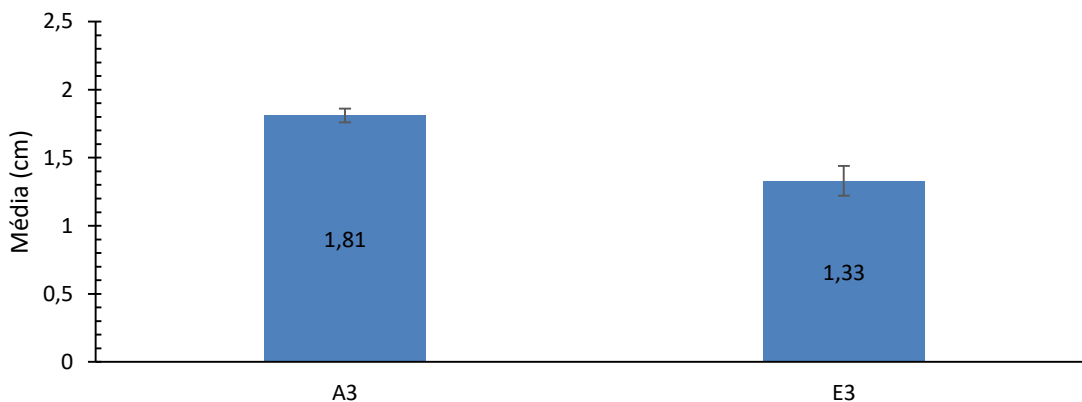


Figura 5.17 - Média de penetração da situação A3 e E3 em cm.

5.3.2 Ciclos longos – 14 dias

7 dias de molhagem e 7 dias de secagem: estão inseridas as situações AA e EA onde é possível observar pela Figura 5.18 que para a situação sem secagem em câmara de carbonatação e 3,5% de NaCl (AA) temos uma média de penetração de 1,67 cm e para a situação com secagem em câmara de carbonatação e 3,5% de NaCl (EA) temos uma média de penetração de 1,31 cm, o que leva a concluir que para este caso a secagem na câmara de carbonatação retardou a penetração de cloretos. Apesar de mais uma vez se notar diferenças muito baixas, repara-se que este fator parece afetar a penetração de cloretos.

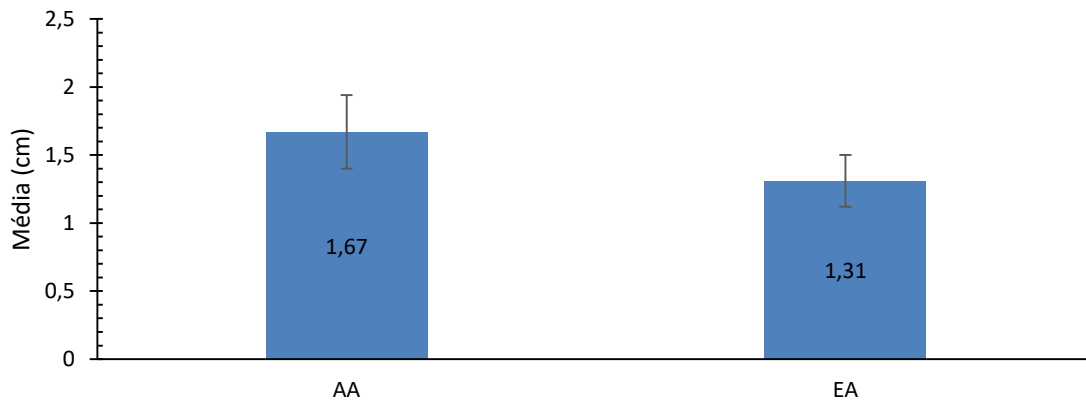


Figura 5.18 - Média de penetração da situação AA e EA em cm.

6 dias de molhagem e 8 dias de secagem: estão inseridas as situações AB e EB onde é possível observar pela Figura 5.19 que para a situação sem secagem em câmara de carbonatação e 3,5% de NaCl (AB) temos uma média de penetração de 1,63 cm e para a situação com secagem em câmara de carbonatação e 3,5% de NaCl (EB) temos uma média de penetração de 1,22 cm, o que leva a concluir que tal como no anterior, a secagem em câmara de carbonatação retarda a penetração de cloretos. Mais uma vez, a diferença entre valores de penetração é muito baixa, sendo essencial aumentar o tempo de ciclo para uma melhor conclusão deste parâmetro.

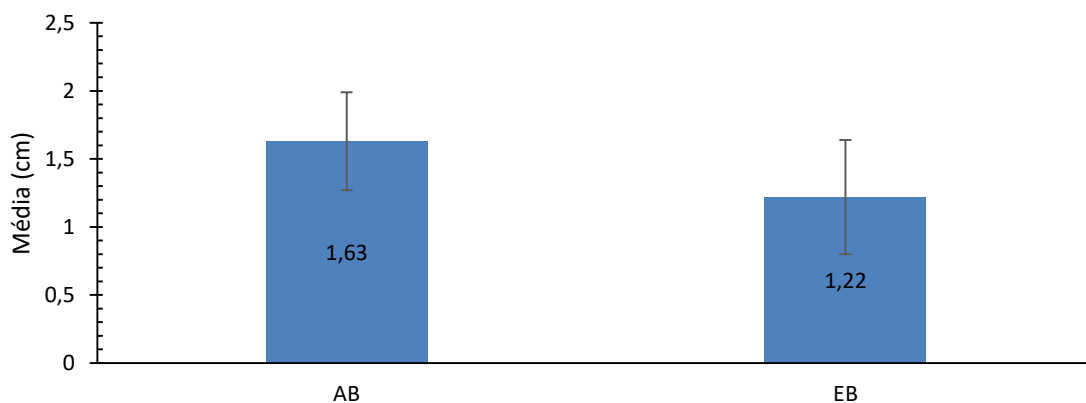


Figura 5.19 - Média de penetração da situação AB e EB em cm.

8 dias de molhagem e 6 dias de secagem: estão inseridas as situações AC e EC onde é possível observar pela Figura 5.20 que para a situação sem secagem em câmara de carbonatação e 3,5% de NaCl (AC) temos uma média de penetração de 1,75 cm e para a situação com secagem em câmara de carbonatação e 3,5% de NaCl (EC) temos uma média de penetração de 1,39 cm, o que leva a concluir que mais uma vez a presença de carbonatação na secagem retardou a penetração de cloretos.

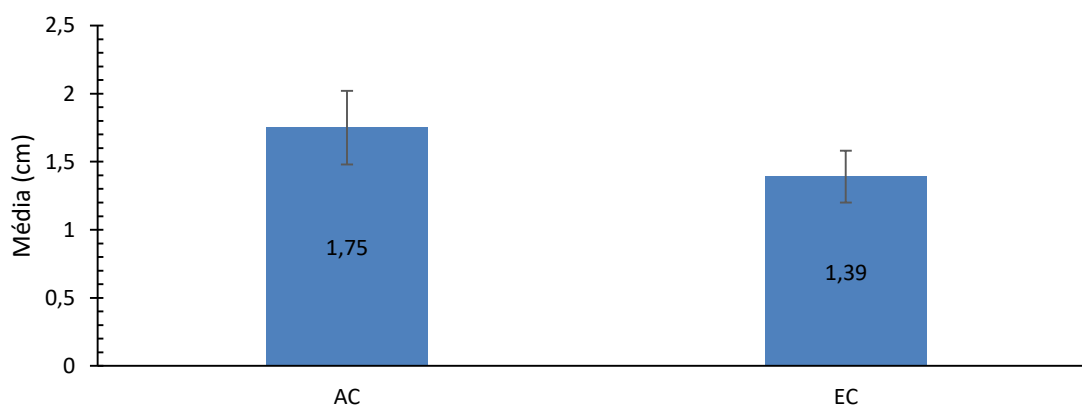


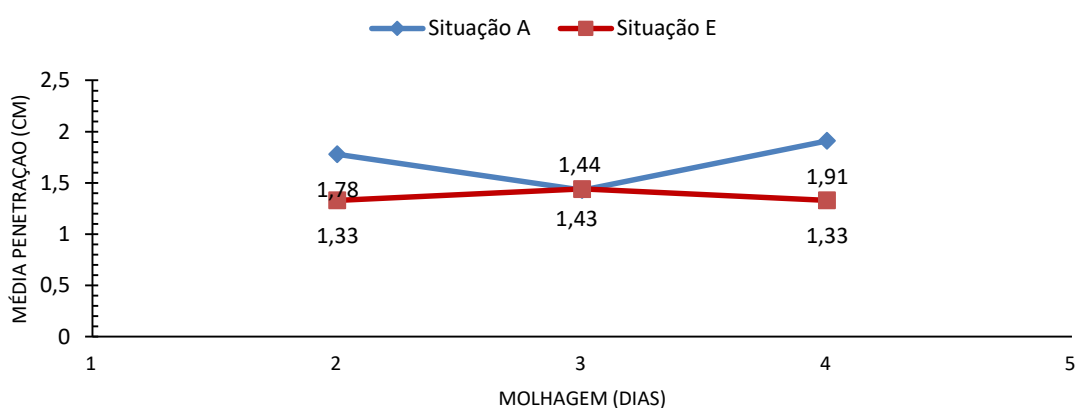
Figura 5.20 - Média de penetração da situação AC e EC em cm.

Todos os resultados vêm de encontro ao estudo de Malheiro *et al.* (2014) [4], que concluiu que a carbonatação exerce alguma influência sobre a penetração de cloretos, quer para o ciclo de 56 dias como para o ciclo de 168 dias. Também Camacho (2015) [1], concluiu que a concentração de cloretos totais diminui substancialmente com a ação combinada, mesmo sabendo que aquando da carbonatação, o pH diminui, libertando os cloretos quimicamente fixados. Esta diminuição ocorre porque a carbonatação implica que o CO_2 reaja com o Ca(OH)_2 existente e forme CaCO_3 (carbonato de cálcio). Este vai colmatar parcialmente os poros e, portanto, dificultar a penetração dos cloretos. Ye *et al.* (2016) [91], diz-nos que a carbonatação pode diminuir a presença de cloretos na região carbonatada.

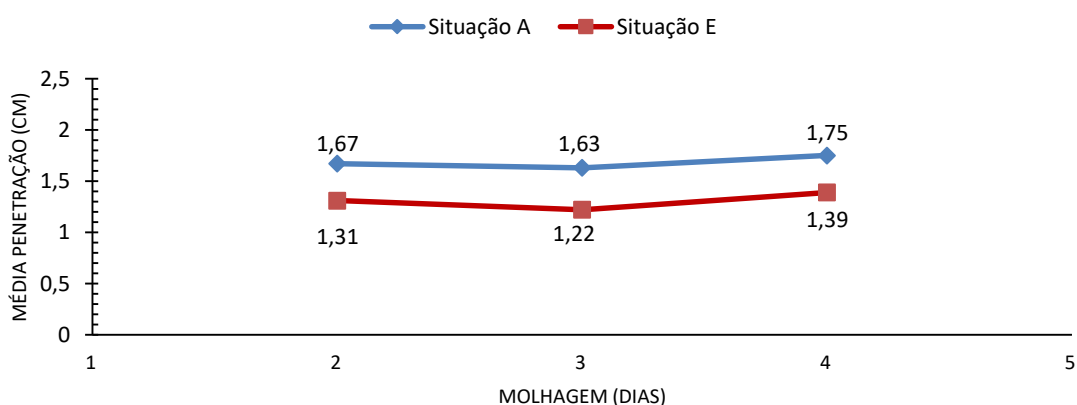
As conclusões foram retiradas para períodos de ciclos de 2 meses, não podendo retirar ilações se de facto, a presença de CO_2 influencia a penetração de cloretos no betão para um período de tempo tão curto. Nestes ciclos nota-se uma ligeira diferença e pouco significativa entre as médias de penetração. Apesar da profundidade de carbonatação ter sido pequena, parece ter influenciado a penetração de cloretos. Estas conclusões podem ser visíveis na Figura 5.21 e

Figura 5.21b, para os ciclos de sete e catorze dias, respetivamente. Na primeira figura de ciclos de 7 dias observa-se que para a situação A (linha azul) a média de penetração de cloretos é superior à situação E (linha vermelha), em secagem com presença de CO₂, para os três diferentes ciclos de molhagem e secagem, com variações de 1% e 30%. Na segunda figura visualizamos o mesmo cenário com a situação A (linha azul) a ter médias de penetração superiores à situação E (linha vermelha), em secagem com presença de CO₂, para os três diferentes ciclos de 14 dias, com variações entre 20 % e 25%.

Em suma, todas as amostras que secaram na câmara de carbonatação apresentaram uma penetração de cloretos inferior.



a)



b)

Figura 5.21 - Média de penetração as situações A e E para ciclos de imersão e secagem de sete dias (a) e catorze dias (b).

5.4 Influência do período total dos ciclos sobre o resultado

Relativamente ao estudo do período total dos ciclos considerou-se importante estudar de que forma os ciclos de sete e catorze dias, interferem ou não, na penetração de cloretos.

Para a situação A, com 3,5% de NaCl, observa-se pela Figura 5.22 que ao fim do período total de dois meses, os ciclos de sete (A1, A2 e A3) (linha azul) e catorze dias (AA, AB e AC) (linha vermelha) não tiveram qualquer tipo de influência na penetração de cloretos, visto ter valores de penetração muito semelhantes. Repara-se que as linhas criadas pela situação A para 7 dias (linha azul) e a situação A para 14 dias (linha vermelha) são muito idênticas e de difícil distinção. Talvez se o tempo total de ensaio fosse maior, conseguir-se-ia chegar a uma melhor conclusão acerca desta variável.

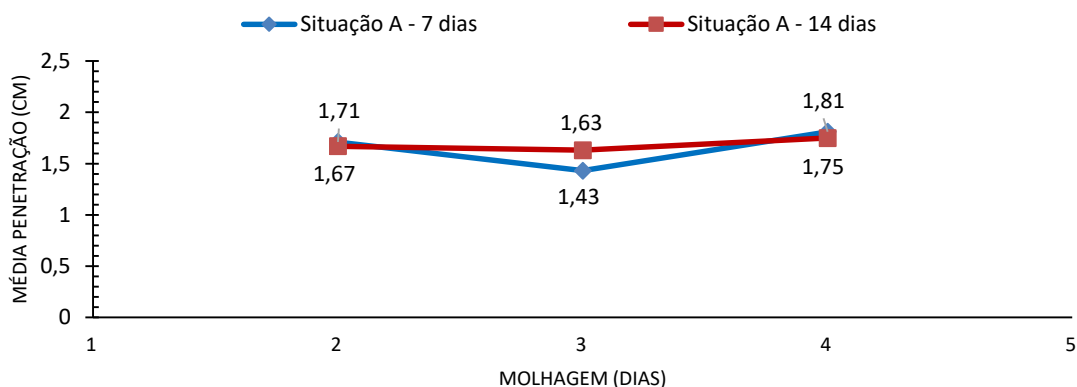


Figura 5.22 - Média de penetração de cloretos da situação A com ciclos de sete (A1, A2 e A3) e catorze dias (AA, AB e AC).

Para a situação B, com 5% de NaCl, observa-se pela Figura 5.23 que ao fim do período total de dois meses, os ciclos de sete (B1, B2 e B3) (linha azul) e catorze dias (BA, BB e BC) (linha vermelha), tal como no anterior, não exerceram qualquer tipo de influência na penetração de cloretos. Repara-se que os valores são muito similares, não podendo ter uma clara definição da influência desta variável.

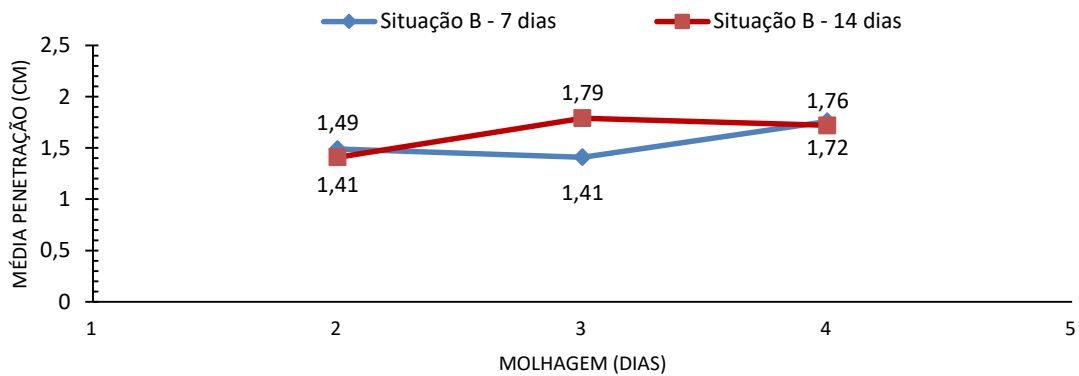


Figura 5.23 - Média de penetração de cloretos da situação B com ciclos de sete (B1, B2 e B3) e catorze dias (BA, BB e BC).

Para a situação C, com 10% de NaCl, observa-se pela Figura 5.24 que ao fim do período total de dois meses, os ciclos de sete (C1, C2 e C3) (linha azul) e catorze dias (CA, CB e CC) (linha vermelha) não tiveram qualquer tipo de influência na penetração de cloretos, visto originarem valores de penetração de cloretos muito semelhantes, com uma grande linearidade de valores.

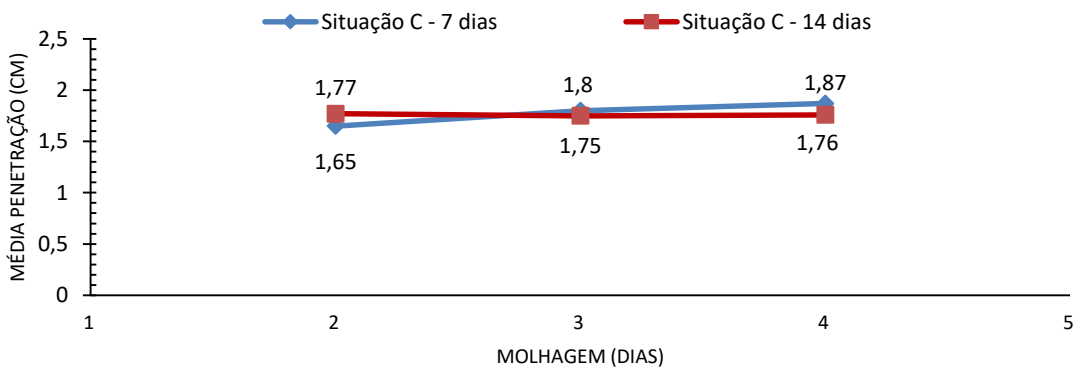


Figura 5.24 - Média de penetração de cloretos da situação C com ciclos de sete (C1, C2 e C3) e catorze dias (CA, CB e CC).

Para a situação D, com 3,5% de NaCl e presença de hidróxido de cálcio, visualiza-se pela Figura 5.25 que ao fim do período total de dois meses, os ciclos de sete (D1, D2 e D3) (linha

azul) e catorze dias (DA, DB e DC) (linha vermelha) originaram valores de penetração de cloretos muito próximos. Existe praticamente uma sobreposição das linhas sem a possibilidade de distinção entre a situação de 7 e 14 dias.

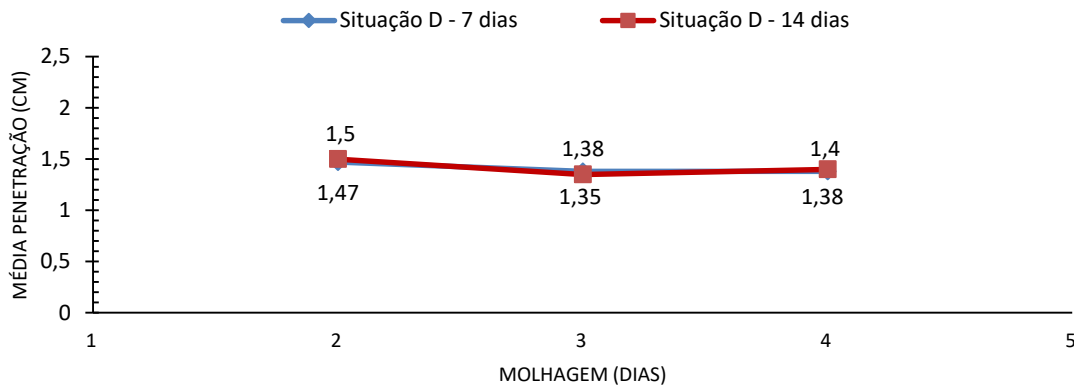


Figura 5.25 - Média de penetração de cloretos da situação C com ciclos de sete (D1, D2 e D3) e catorze dias (DA, DB e DC).

Para a situação E, com 3,5% de NaCl e secagem em câmara de carbonatação, visualiza-se pela Figura 5.26 que ao fim do período total de dois meses, os ciclos de sete (E1, E2 e E3) (linha azul) e catorze dias (EA, EB e EC) (linha vermelha), a tendência da linearidade dos valores mantém-se, sendo portanto difícil concluir se de facto os ciclos têm influência para um período de ensaio tão curto.

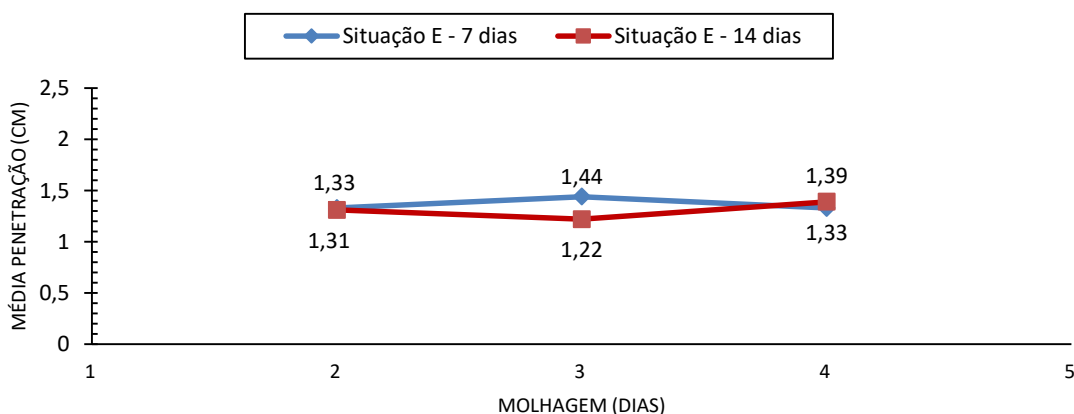


Figura 5.26 - Média de penetração de cloretos da situação E com ciclos de sete (E1, E2 e E3) e catorze dias (EA, EB e EC).

No que diz respeito à profundidade de penetração de cloretos, observa-se que os ciclos longos, 14 dias, são menos eficazes uma vez que conduzem a menores valores de penetração de cloretos.

De uma maneira geral, o tempo total de ensaio parece ser pouco, não permitindo alcançar corretas conclusões acerca da influência dos ciclos de imersão e secagem de sete e catorze dias.

5.5 Influência do período de secagem

5.5.1 Influência do período de secagem para ciclos curtos (7 dias)

Neste subcapítulo vai ser medido de que forma o período de secagem afetou a penetração de cloretos para os ciclos de imersão e secagem de sete dias.

Para tal, começa-se por analisar a situação A, composto por A1, A2 e A3, com cinco, quatro e três dias de secagem, respetivamente, e 3,50% de NaCl. Pela análise da Figura 5.27, observa-se uma penetração com valores muito próximos e que não permitem retirar uma conclusão clara acerca desta variável, no entanto com uma ligeira tendência para uma maior penetração para a situação com menos dias de secagem, no caso a A3, podendo ser também verificado pela linha de tendência. O desvio padrão também aparenta uma dispersão bastante reduzida.

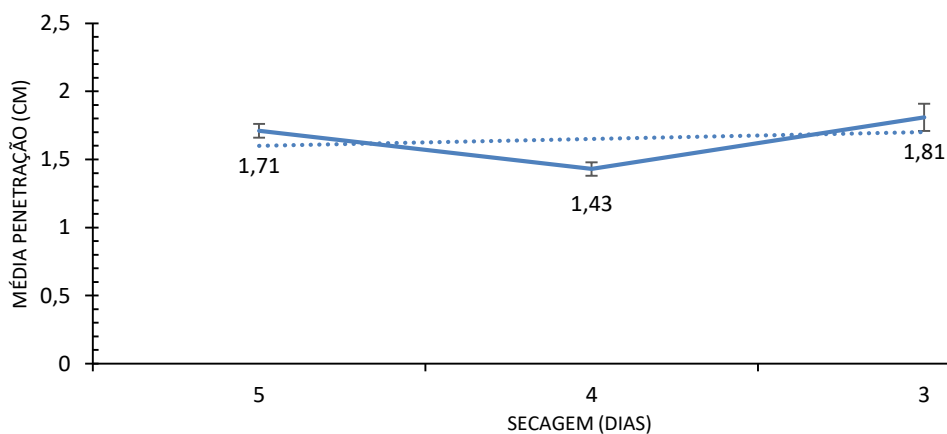


Figura 5.27 - Média de penetração de cloretos da situação A para ciclos de 7 dias (A1, A2 e A3).

A situação B é composta por B1, B2 e B3, com cinco, quatro e três dias de secagem, respectivamente, e 5% de NaCl. Verificando a Figura 5.28 observam-se valores de penetração com grande proximidade, onde tal como na situação anterior se nota um ligeiro aumento de cloretos para o caso com menos dias de secagem. Com um aumento do período total de ensaio poder-se-iam retirar ilações com mais certeza. O desvio padrão também apresenta uma dispersão baixa, ou seja, estamos perante diferenças de penetração muito baixas.

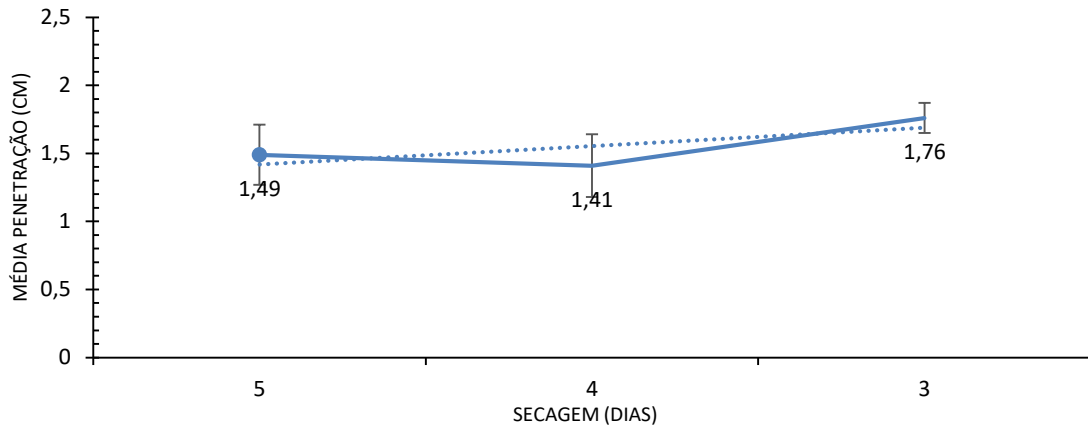


Figura 5.28 - Média de penetração de cloretos da situação B para ciclos de 7 dias (B1, B2 e B3).

A situação C é composta por C1, C2 e C3, com cinco, quatro e três dias de secagem, respectivamente, e 10% de NaCl. Com base nos resultados obtidos e explícitos na Figura 5.29 nota-se uma linearidade de valores, com diferenças muito baixas, não sendo possível concluir a influência do período de secagem para um período de ensaio tao curto. Mais uma vez, e observando a linha de tendência crescente, repara-se num ligeiro crescimento de cloretos para a situação com menos dias de secagem, no entanto não conclusiva.

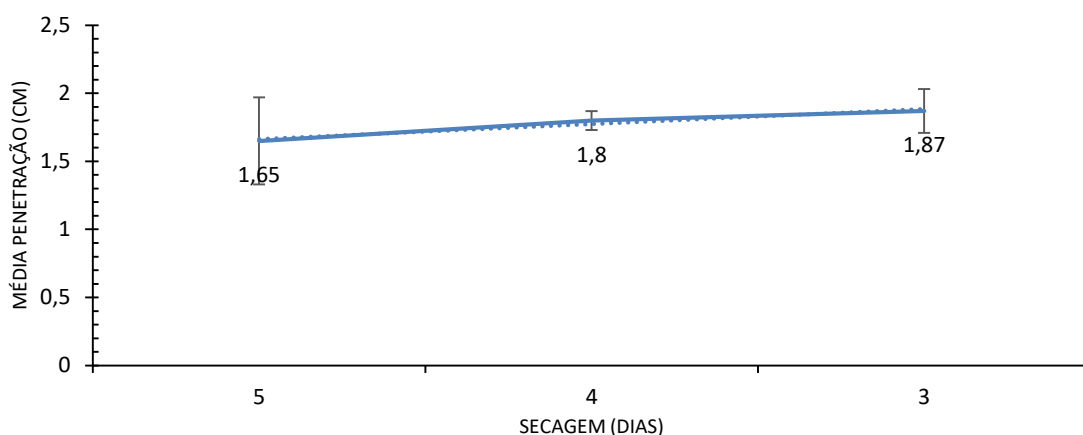


Figura 5.29 - Média de penetração de cloretos da situação C para ciclos de 7 dias (C1, C2 e C3).

A situação D é composta por D1, D2 e D3, com cinco, quatro e três dias de secagem, respectivamente, 3,50% de NaCl e presença de hidróxido de cálcio. Aparentemente pela observação da Figura 5.30 não é possível retirar qualquer tipo de conclusão acerca desta variável, visto ter médias de penetração muito próximas, observando uma linha de tendência muito horizontal. O desvio padrão também apresenta uma dispersão muito baixa.

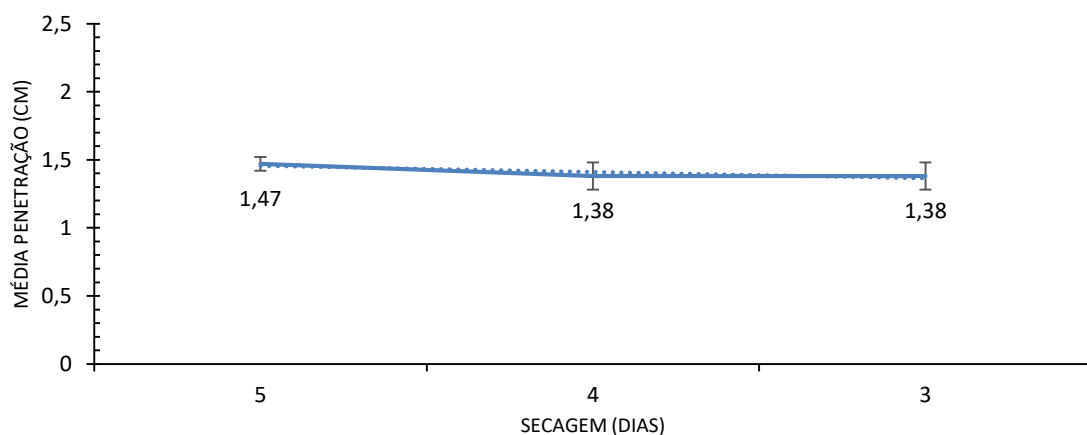


Figura 5.30 - Média de penetração de cloretos da situação D para ciclos de 7 dias (D1, D2 e D3).

A situação E é composta por E1, E2 e E3, com cinco, quatro e três dias de secagem, respectivamente, 3,50% de NaCl e secagem em câmara de carbonatação. Visualizando a Figura

5.31 é notória a linearidade de valores, não permitindo qualquer tipo de conclusão acerca da entrada de cloretos nas amostras. Mais uma vez, apenas com um período de ensaio superior seria possível afirmar com mais certeza a influência do período de secagem na penetração de cloretos.

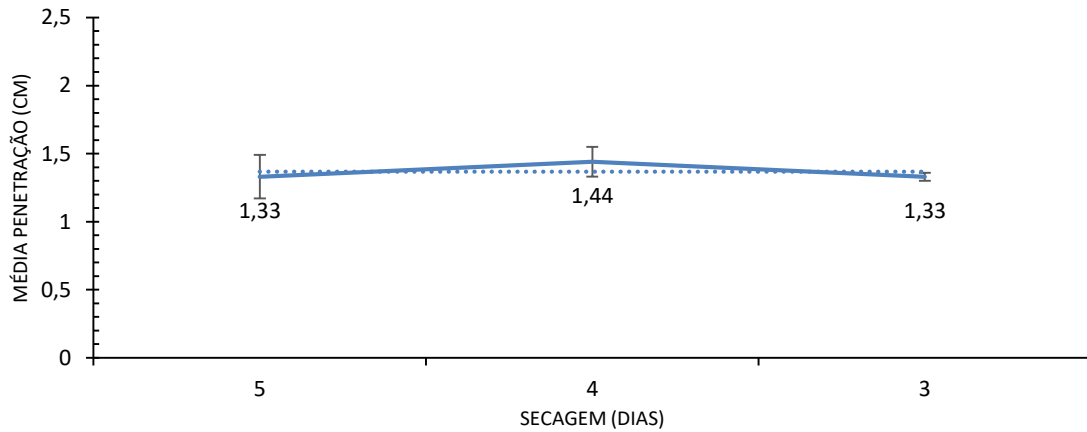


Figura 5.31 - Média de penetração de cloretos da situação E para ciclos de 7 dias (E1, E2 e E3).

Acerca da profundidade de carbonatação também não é possível retirar ilações, pois observando a Figura 5.32 notam-se valores muito próximos de carbonatação.

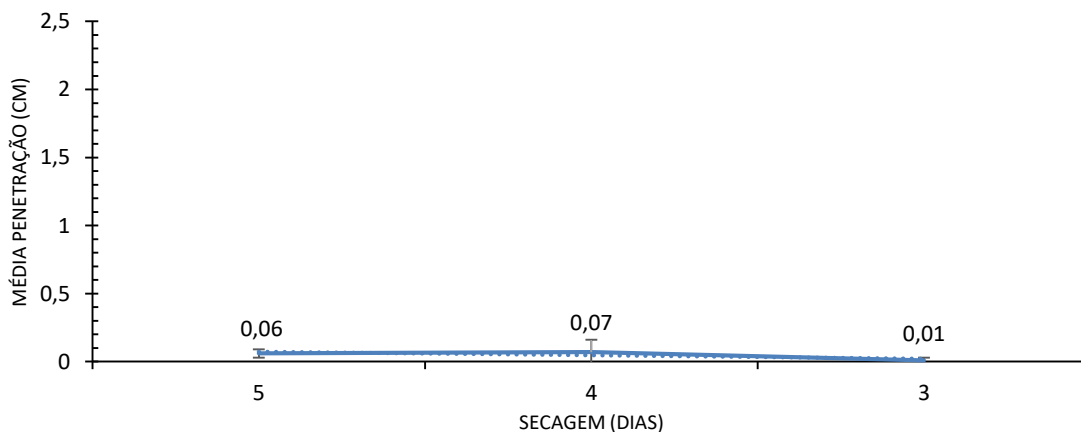


Figura 5.32 - Média de carbonatação para a situação E com ciclos de 7 dias (E1, E2 e E3).

De modo geral, não é possível avaliar a influência do período de secagem para um período de dois meses, visto haver pouca dispersão entre os resultados. Contudo, nota-se um ligeiro

aumento de cloretos nas amostras para a situação onde esteve menos tempo em secagem, sendo necessário mais tempo de ensaio para afirmar com mais clareza se o período de secagem tem uma grande interferência ou não na penetração de cloretos.

5.5.2 Influência do período de secagem para ciclos longos (14 dias)

Neste subcapítulo vai ser medido de que forma o período de secagem afetou a penetração de cloretos para os ciclos de imersão e secagem de catorze dias.

Para o efeito começa-se com a análise da situação A composta por AA, AB e AC com sete, oito e seis dias de secagem, respetivamente, e 3,50% de NaCl. Analisando a Figura 5.33 nota-se uma grande similaridade entre as médias de penetração, não sendo possível tecer conclusões acerca do efeito do tempo de secagem. Tal como em alguns casos dos ciclos de sete dias descritos anteriormente nota-se um ligeiro acréscimo de cloretos na situação onde o tempo de secagem é menor, no entanto sem uma grande diferença que permita uma definitiva conclusão.

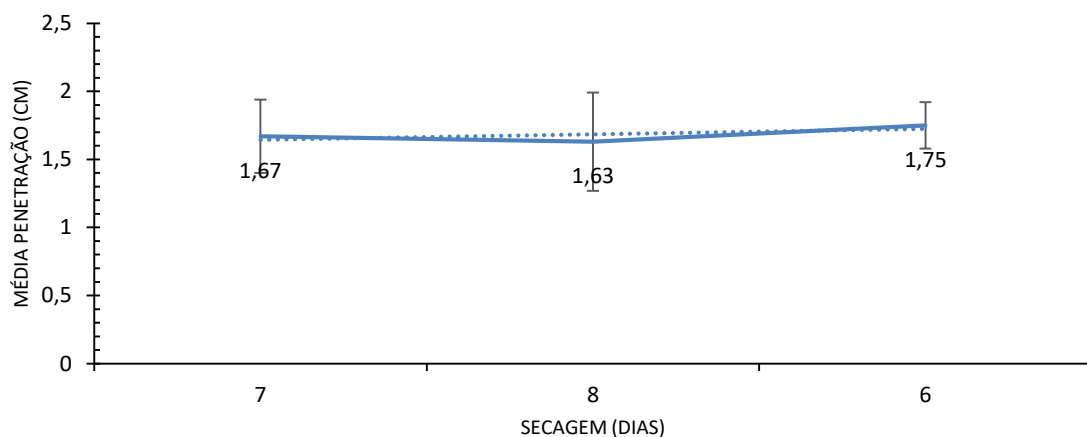


Figura 5.33 - Média de penetração de cloretos da situação A para ciclos de 14 dias (AA, AB e AC).

A situação B é composta por BA, BB e BC, com sete, oito e seis dias de secagem, respetivamente, e 5% de NaCl. Na observação da Figura 5.34 conclui-se que tal como na anterior não é possível chegar a um consenso acerca dos dias de secagem, visto ter valores com diferenças pouco significativas.

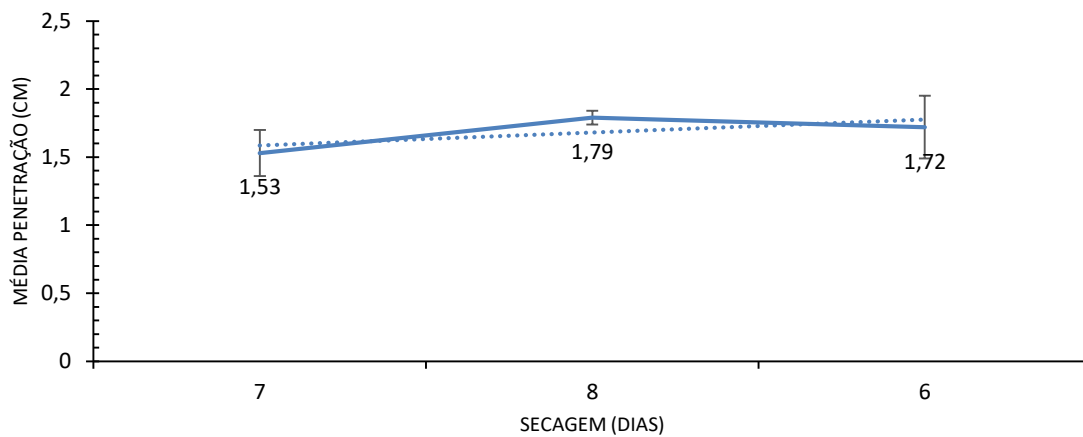


Figura 5.34 - Média de penetração de cloretos da situação B para ciclos de 14 dias (BA, BB e BC).

A situação C é composta por CA, CB e CC, com sete, oito e seis dias de secagem, respectivamente, e 10% de NaCl. No caso desta situação, por observação da Figura 5.35 é mais uma vez notória a falta de capacidade de conclusão acerca desta variável, devido ao curto espaço de tempo do ensaio. As diferenças obtidas são correspondentes ao erro de ensaio com uma ordem de dispersão muito baixa.

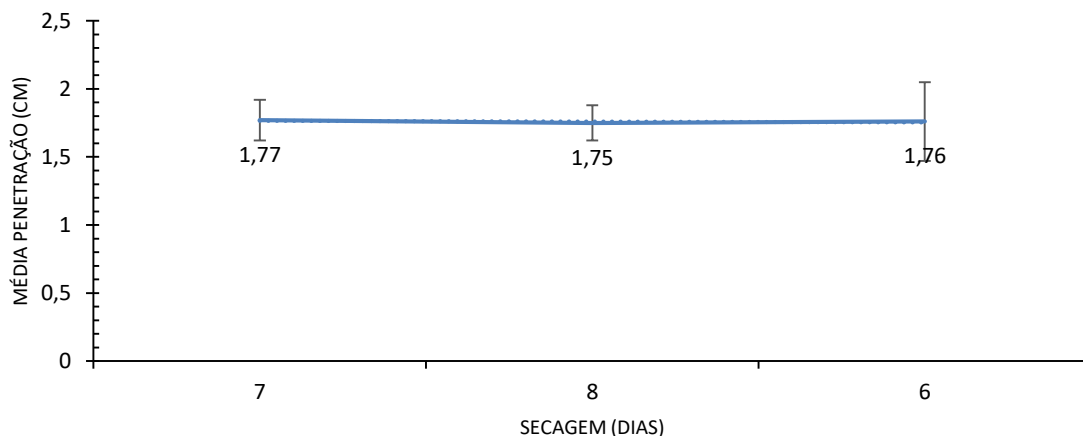


Figura 5.35 - Média de penetração de cloretos da situação C para ciclos de 14 dias (CA, CB e CC).

A situação D é composta por DA, DB e DC, com sete, oito e seis dias de secagem, respectivamente, 3,50% de NaCl e presença de hidróxido de cálcio. Aparentemente pela Figura

5.36 notam-se mais uma vez valores muito próximos, não possibilitando retirar qualquer conclusão acerca desta variável. Também apresenta uma dispersão reduzida, com um coeficiente de dispersão inferior a 14%.

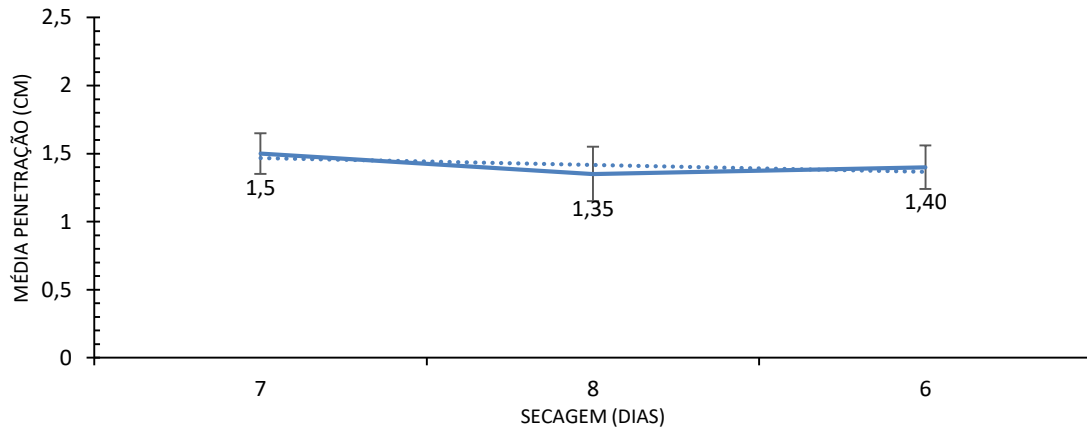


Figura 5.36 - Média de penetração de cloretos da situação D para ciclos de 14 dias (DA, DB e DC).

A situação E é composta por EA, EB e EC, com sete, oito e seis dias de secagem, respectivamente, 3,50% de NaCl e secagem em câmara de carbonatação. Nesta situação e por análise da Figura 5.37 notam-se mais uma vez pequenas diferenças entre os valores de penetração de cloretos não permitindo tecer conclusões corretas sobre esta influência. Tal como em maior parte dos anteriores visualiza-se um ligeiro aumento de cloretos para a situação onde o tempo de secagem é menor.

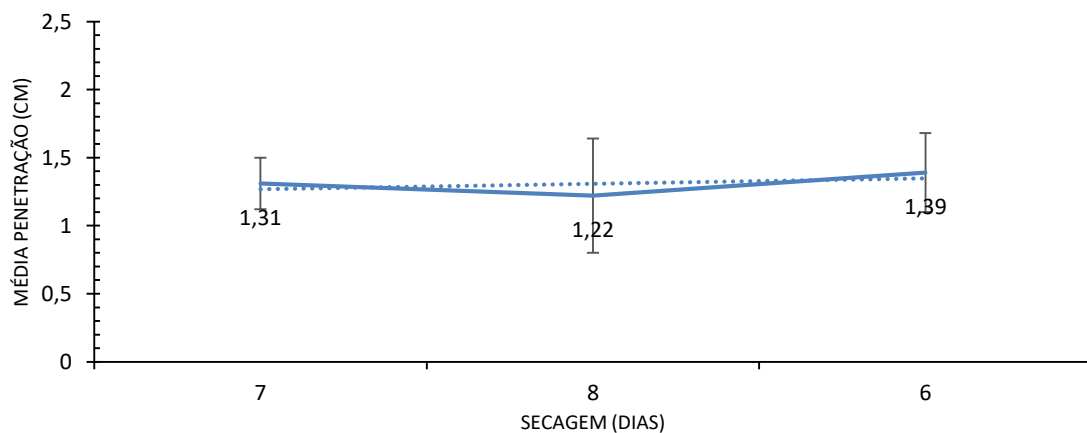


Figura 5.37 - Média de penetração de cloretos da situação E para ciclos de 14 dias (EA, EB e EC).

Relativamente à carbonatação não é possível retirar qualquer conclusão acerca da influência do período de secagem visto ter alcançado valores muito reduzidos, de 0,2 cm, 0,14 cm e 0,00 cm para EA, EB e EC, respetivamente.

6 CONCLUSÕES

6.1 Conclusões gerais

É importante realçar que todas as conclusões que se seguem estão relacionadas com as condições estudadas e, por isso, não devem ser considerados de maneira absoluta, pois referem-se aos materiais investigados neste trabalho experimental e aos ensaios aqui utilizados, formando um ambiente diferente ao cenário real. A comparação dos resultados obtidos com os apresentados em estudos semelhantes revelou-se, como esperado, dificultada devido ao uso de diferentes metodologias de ensaio. Relativamente à influência do teor de NaCl na fase de molhagem, após terem sido estudadas três distintas percentagens com 3,50%, 5 % e 10%, chega-se à conclusão que o aumento do teor de NaCl na solução de imersão, não altera de maneira significativa a profundidade de penetração de cloretos na argamassa. Nos ensaios cíclicos, tanto nos curtos quanto nos longos, não se verifica uma relação clara entre o aumento no teor de NaCl e o aumento na profundidade de penetração. Ao contrário, apesar de subtil, provavelmente por causa do curto período total de ensaio, nos provetes submetidos ao ensaio de imersão por 60 dias, observa-se uma tendência de aumento na profundidade de penetração de cloretos com o aumento do teor de NaCl na solução. Além disso, a semelhança entre as profundidades de penetração de cloretos atingida em ambos os ensaios, colocam em causa o uso dos ensaios cíclicos, para períodos de tempo tão curtos como o utilizado nesta pesquisa, quando se pretende um avanço rápido, em profundidade, da penetração de cloretos.

Em relação ao estudo da presença de hidróxido de cálcio na fase de molhagem, através de uma solução saturada, foi possível observar que, de uma forma geral, o mesmo retardou a penetração de cloretos na argamassa. Este atraso refletiu-se de maneira mais expressiva na diferença entre as profundidades de penetração de cloretos atingidas no ensaio de imersão, apresentando uma diferença entre as mesmas de, aproximadamente, 28%.

Estudando a presença de CO₂ na fase de secagem dos ciclos de imersão e secagem, é possível concluir que este fator pode ter atrasado a penetração de cloretos. Nestes ciclos notam-se ligeiras diferenças e pouco significativas entre as médias de penetração, onde apesar da carbonatação ter sido pequena e pouco significativa parece ter influenciado a penetração de cloretos. Com o aumento do período total do ensaio e, conseqüentemente, um aumento na profundidade de carbonatação, tornaria mais clara a influência desta variável na penetração de cloretos.

Quanto ao estudo da influência do período total dos ciclos, de sete ou catorze dias, não se fez sentir visto os respectivos valores de penetração de cloretos terem sido muito semelhantes.

Relativamente à influência do período de secagem dos ciclos de imersão e secagem, notou-se um ligeiro aumento da penetração de cloretos para a situação onde as amostras estiveram menos tempo em secagem e, portanto, mais tempo em molhagem.

De uma maneira geral, foi possível observar que a presença de dióxido de carbono na fase de secagem, a presença de hidróxido de cálcio na fase de molhagem e o menor tempo de secagem nos ciclos estudados podem ser apontados como os fatores que alteraram de maneira mais clara, apesar pouco significativa, a profundidade de penetração de cloretos. Este aspeto foi visível tanto nos ensaios cíclicos como no ensaio de imersão, uma vez que contribuiu para um atraso da penetração de cloretos na argamassa testada sob as condições estudadas.

É de ressaltar, também, que um período total de ensaio mais alargado pode conduzir a valores mais significativos e contundentes no que diz respeito às variáveis estudadas.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com o objetivo de completar e alargar o estudo desta dissertação, contribuindo para um melhor desenvolvimento do estudo relacionado com os ciclos de imersão e secagem, propõem-se algumas sugestões para realização de trabalhos futuros.

De seguida são apresentadas todas as propostas de trabalhos futuros:

- Estudar tempos mais longos de ensaio;
- Variar as condições de secagem com diferentes condições de humidade e temperatura;
- Estudar a concentração de cloretos ao longo da profundidade de penetração, através da determinação do perfil de cloretos totais;
- Estudar diferentes composições de argamassa fazendo variar razão água/ligante;
- Estudar diferentes composições de argamassa incorporando adições minerais, como por exemplo cinzas volantes.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. 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.
- [2] R. M. Ferreira, “Optimização da vida útil das estruturas de betão armado,” *4as Jornadas Port. Eng. Estruturas*, pp. 1–16, 2006.
- [3] F. J. T. H. Carminho, “Resistência do betão à compressão em cubos VS cilindros,” Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- [4] M. Raphaele, C. Aires, F. R. Miguel, M. Gibson, A. Teresa, and R. Rui, “Influência da carbonatação no transporte de cloretos em argamassas submetidas à ação combinada destes dois agentes,” *Congr. Luso-Brasileiro Mater. Construção Sustentáveis*, pp. 479–487, 2014.
- [5] J. M. E. S. Silva, “Caracterização de amostras de betão recolhidas ao longo de dois túneis da Região Autónoma da Madeira,” Dissertação de Mestrado, Universidade da Madeira, 2014.
- [6] R. Malheiro, “Influência do revestimento de argamassa no transporte de cloretos em estruturas de concreto armado inseridas no meio urbano,” Dissertação de Mestrado, Universidade federal da Paraíba, 2008.
- [7] M. Coutinho, “Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem,” Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, 1998.
- [8] P. Castro, O. T. De Rincon, and E. J. Pazini, “Interpretation of chloride profiles from concrete exposed to tropical marine environments,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, no. 4, pp. 529–537, 2001.
- [9] G. Polito, “Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação,” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.
- [10] I. Filipa Garcia Monteiro, “Modelação da evolução da carbonatação em elementos de betão armado,” Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, 2010.

- [11] A. Costa and J. Appleton, “Análise da penetração de cloretos em estruturas de betão armado expostas ao ambiente marítimo,” *Rev. Port. Eng. Estruturas*, p. 11, 1999.
- [12] P. Cerný, R.; Pavlík, Z.; Rovnaníková, “Experimental Analysis of Coupled Water and Chloride Transport in Cement Mortar,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 26, pp. 705–715, 2004.
- [13] C. L. Wang, Y., Li, L., Page, “Modelling of Chloride Ingress into Concrete from a Saline Environment,” vol. 40, pp. 1573–1582, 2005.
- [14] E.-I. Han, S.; Park, Woo-Sun.; Yang, “Evaluation of concrete durability due to carbonation in harbor concrete structures,” *Constr. Build. Mater.* 48, pp. 1045–1049, 2013.
- [15] A. Costa, “Durabilidade Estruturas de Betão,” vol. 2. p. 63, 2013.
- [16] A. Camões, “Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes,” Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, 2002.
- [17] T. Carmona and P. Helene, “Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação,” *Bol. Técnico da Esc. Politécnica da USP*, vol. 425, no. 0103–9830, p. 103, 2006.
- [18] NP EN 206-1, *Betão - Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*. 2007, p. 84.
- [19] C. Andrade, O. Río, A. Castillo, M. Castellote, S. E. Torroja, and C. S. Galvache, “Prediction of reinforced concrete service life through the measurement of electrical resistivity of specimens subjected to natural exposure conditions,” *10DBMC Int. Conférence Durab. Build. Mater. Components LYON [France] 17-20 April 2005*, p. 8, 2005.
- [20] K. Tuutti, “Corrosion of steel in concrete,” Dissertação de Mestrado, Lund University, 1982.
- [21] V. 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,” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

-
- [22] O. Cascudo, *O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas*. 1997.
- [23] T. M. H. Santos, “Corrosão das Armaduras do Betão Armado - Causas , Consequências , Prevenção e Projeto de Durabilidade,” Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2014.
- [24] F. G. Da silva, “Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos,” Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2006.
- [25] Â. E. L. Amaral, “Teor crítico de cloretos para iniciação da corrosão do aço no betão,” Dissertação de Mestrado, Dissertação de Mestrado, Instituto Politécnico de Lisboa, 2012.
- [26] C. Crauss, “Penetração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial,” Universidade Federal de Santa Maria, 2010.
- [27] S. P. M. Coito, “Avaliação probabilística da vida útil de estruturas de betão sob a ação da carbonatação e dos cloretos,” Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, 2008.
- [28] R. Ferreira, “Avaliação de ensaios de durabilidade do betão,” Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, 2000.
- [29] Joana Coutinho, “Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem,” Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, 1995.
- [30] “Durable Concrete Structures. CEB Design Guide-Bulletin d’Information.” .
- [31] F. Missau, “Penetração de cloretos de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz,” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, 2004.
- [32] LNEC E 393, *Determinação da absorção de água por capilaridade*. 1993, p. 2.
- [33] F. Nugue, S. Lorente, and J. Pierre, “Fundamentos para a previsão do ingresso de cloretos em materiais cimentícios,” *Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil*, vol. 1, pp. 10–21, 2004.
- [34] J. Crank, *The mathematics of diffusion*. 1975.
-

- [35] M. H. F. De Medeiros, “Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos,” *Universidade de São Paulo Escola Poli.* p. 218, 2008.
- [36] TONG L.; GJØRV O. E., “Chloride diffusivity based on migration testing,” vol. 31, pp. 973–982, 2001.
- [37] C. Andrade, “Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements,” vol. 23, pp. 724–742, 1993.
- [38] A. Troian, “Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloretos,” Dissertação de Mestrado, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2010.
- [39] N. F. L. Melo, “Durabilidade de betões com metacaulino - propagação de cloretos,” Universidade de Aveiro, 2013.
- [40] NT Build 492, *Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments.* 1999, pp. 1–8.
- [41] LNEC E 463, *Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário.* 2004, p. 8.
- [42] G. R. Meira, “Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado,” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- [43] D. Conciatori, F. Laferrière, and E. Brühwiler, “Comprehensive modeling of chloride ion and water ingress into concrete considering thermal and carbonation state for real climate,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, no. 1, pp. 109–118, 2010.
- [44] S. U. Balouch, J. P. Forth, and J.-L. Granju, “Surface corrosion of steel fibre reinforced concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, no. 3, pp. 410–414, 2010.
- [45] S. Bioubakhsh, “The penetration of chloride in concrete subject to wetting and drying: measurement and modelling,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 1, p. 355, 2011.
- [46] A. E. T. C.L. Page, N.R. Short, “Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes,”

- vol. 11, no. 3, pp. 395–406, 1981.
- [47] J. Ricardo and M. Lage, “Estudo da influência da amostragem e da metodologia de colheita de betão em pó para a determinação do teor de cloretos,” Dissertação de Mestrado, Técnico de Lisboa, 2013.
- [48] F. H. D. Rasheeduzzafar, S.S. Al-Saadoun, A.S. Al-Gahtani, “Effect of tricalcium aluminate content of cement on corrosion of reinforcing steel in concrete,” vol. 20, no. 5, pp. 723–738, 1990.
- [49] 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, no. 1, pp. 47–53, 2007.
- [50] A. M. Neville, *Propriedades do Concreto*, 2nd ed. 1997.
- [51] A. Lindvall, “Chloride ingress data from field and laboratory exposure - Influence of salinity and temperature,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 29, no. 2, pp. 88–93, 2007.
- [52] F. P. G. O.Mejlhede Jensen, , P.Freiesleben Hansen, A.M. Coats, “Chloride ingress in cement paste and mortar,” vol. 29, no. 9, pp. 1497–1504, 1999.
- [53] E. P. Nielsen and M. R. Geiker, “Chloride diffusion in partially saturated cementitious material,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 1, pp. 133–138, 2003.
- [54] LNEC E 464, *Metodologia prescritiva para uma vida útil de projecto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais*. 2007, p. 15.
- [55] A. Costa, “Durabilidade de Estruturas de Betão armado em ambiente marítimo.” Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, 1997.
- [56] R. Browne, *Marine durability survey of the Tong Sand Tower*. Cement and Concrete Association, 1980.
- [57] C. Andrade, *Calculation of initiation and propagation periods of service life of reinforcement by using the electrical resistivity*. RILEM Publications SARL, 2004.
- [58] “O que é a cal?” [Online]. Available: http://www.lhoist.com/br_br/quer-saber-mais-sobre.

- [59] R. Meireles, D. C. Malheiro, G. R. Meira, and M. S. De Lima, “Influência da camada do revestimento de argamassa na penetração de cloretos em estruturas de concreto,” pp. 41–55, 2014.
- [60] A. Costa and J. Appleton, “Concrete Carbonation and Chloride Penetration in a Marine Environment,” *Concrete Science and Engineering*, vol. 3, no. December. pp. 242–249, 2001.
- [61] V. Elfmarkova, P. Spiesz, and H. J. H. Brouwers, “Determination of the chloride diffusion coefficient in blended cement mortars,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 78, pp. 190–199, 2015.
- [62] C. A. M Castellote, , C Andrade, “Measurement of the steady and non-steady-state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity in the anolyte chamber. Comparison with natural diffusion tests,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, no. 10, pp. 1411–1420, 2001.
- [63] P. R. do L. H. Eliana Cristina Barreto Monteiro, “Avaliação do método de extração eletroquímica de cloretos para reabilitação de estruturas de concreto com problemas de corrosão de armaduras,” Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2002.
- [64] S. L. de Assis, “Estudo comparativo de ensaios acelerados para simulação da corrosão atmosférica sérgio luiz de assis,” Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2000.
- [65] D. Souza.M.K, “Ensaio de Névoa Salina,” *Rev I*, p. 4, 2011.
- [66] I. Costa, D. O. Souza, N. P. Hammel, W. I. A. Santos, A. H. Ramirez, N. Rojo, “Investigação Da Corrosividade Do Ensaio De Névoa Salina Segundo Norma Iso 9227,” *Encontro e Expo. Bras. Trat. Superf. III INTERFINISH Lat. Am.*, pp. 360–367.
- [67] J. Wu, H. Li, Z. Wang, and J. Liu, “Transport model of chloride ions in concrete under loads and drying-wetting cycles,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 112, pp. 733–738, 2016.
- [68] W.-L. J. Long-yuan Lia, Dave Easterbrooka, Jin Xiab, , “Numerical simulation of chloride penetration in concrete in rapid chloride migration tests,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 63, pp. 113–121, 2015.

- [69] C. Andrade, M. Prieto, P. Tanner, F. Tavares, and R. D’Andrea, “Testing and modelling chloride penetration into concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 39, pp. 9–18, 2013.
- [70] D. McPolin, P. A. M. Basheer, A. E. Long, K. T. V Grattan, and T. Sun, “Obtaining progressive chloride profiles in cementitious materials,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 19, no. 9, pp. 666–673, 2005.
- [71] R. B. Polder and W. H. A. Peelen, “Characterisation of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 24, no. 5, pp. 427–435, 2002.
- [72] Z. Yu, Y. Chen, P. Liu, and W. Wang, “Accelerated simulation of chloride ingress into concrete under drying-wetting alternation condition chloride environment,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 93, pp. 205–213, 2015.
- [73] L. B. M. Masi, D. Colella, G. Radaelli, “Simulation of chloride penetration in cement-based materials,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 27, no. 10, pp. 1591–1601, 1997.
- [74] M. A. C. Lucia de Fátima L. da Costa Pereira, “Determinação de cloretos em concreto de cimentos portland: influência do tipo de cimento,” Universidade de São Paulo, 2001.
- [75] F. He, C. Shi, Q. Yuan, X. An, and B. Tong, “Calculation of chloride concentration at color change boundary of AgNO₃ colorimetric measurement,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 11, pp. 1095–1103, 2011.
- [76] ASTM C 1152, *Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete*. 1999, pp. 3–5.
- [77] O. K. and B. Zhu, “Corrosion Measurements in Three Types of Reinforced Concrete Slabs Exposed to Chloride Solution,” vol. 192, pp. 507–522, 2000.
- [78] Q. Yuan, C. Shi, F. He, G. De Schutter, K. Audenaert, and K. Zheng, “Effect of hydroxyl ions on chloride penetration depth measurement using the colorimetric method,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, no. 10, pp. 1177–1180, 2008.
- [79] M. Y. Kim, E. I. Yang, and S. T. Yi, “Application of the colorimetric method to chloride diffusion evaluation in concrete structures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 41, pp.

239–245, 2013.

- [80] J. P. Sofia Real, J. Alexandre Bogas, “Chloride migration in structural lightweight aggregate concrete produced with different binders,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 98, pp. 425–436, 2015.
- [81] C. B. de França, “Avaliação de Cloretos Livres em Concretos pelo Método de Aspersão de Solução de Nitrato de Prata,” Dissertação de Mestrado, Universidade católica de Pernambuco, 2011.
- [82] ASTM C1202-05, *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. .
- [83] Q. Yuan, D.-H. Deng, C.-J. Shi, and G. de Schutter, “Application of silver nitrate colorimetric method to non-steady-state diffusion test,” *J. Cent. South Univ.*, vol. 19, no. 10, pp. 2983–2990, 2012.
- [84] NP EN 197-1, *Cimento - Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*. 2012, p. 197.
- [85] SECIL, “Cimento Portland - EN 197-1 CEM I 42,5R.” p. 1.
- [86] NP EN 933-1, *Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica - Modo de peneiração*. 2000, p. 15.
- [87] EN 1015-3, *Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*, no. 1. 2004, p. 10.
- [88] NP EN 12390-3, *Ensaio do betão endurecido - Parte 3: Resistência à compressão dos provetes*. 2011, p. 6.
- [89] LNEC E 394, *Determinação da absorção de água por imersão*. 1993.
- [90] ONR CEN/TS 12390-12, *Testing hardened concrete - Part 12: Determination of the potential carbonation resistance of concrete: Accelerated carbonation method*. 2011.
- [91] H. Ye, X. Jin, C. Fu, N. Jin, Y. Xu, and T. Huang, “Chloride penetration in concrete exposed to cyclic drying-wetting and carbonation,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 112, pp. 457–463, 2016.

