



## Durabilidade do Betão e Corrosão das armaduras

VANESSA FILIPA MOREIRA OLIVEIRA

novembro de 2024



# Durabilidade do Betão e Corrosão das armaduras

VANESSA FILIPA MOREIRA OLIVEIRA

Outubro de 2024

**DURABILIDADE DO BETÃO**

**E**

**CORROSÃO DAS ARMADURAS**

**Vanessa Filipa Moreira Oliveira**

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil, Área de especialização em  
Construções**

**Orientador: Professor Doutor Carlos Manuel da Silva Félix**

**Co-orientadora: Engenheira Doutora Cristina Alves Ribeiro**

**Júri:**

**Presidente:**

Professora Doutora Maria do Rosário Oliveira, Professora Adjunta, ISEP

**Vogais:**

Engenheira Doutora Helena Isabel Maia Figueiras, NEWMENSUS

Engenheira Doutora Cristina Alves Ribeiro, SENQUAL

Outubro de 2024

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

ISEP, Porto, 10 de Outubro de 2024

A handwritten signature in blue ink that reads "Vanessa Oliveira". The signature is written in a cursive style with a large initial 'V'.





## RESUMO

A durabilidade do betão é um dos principais fatores que determinam a vida útil das estruturas de betão armado. O betão, apesar da sua elevada resistência mecânica, é um material poroso que pode permitir a penetração de agentes agressivos, como os cloreto e dióxido de carbono, que são os principais responsáveis pela corrosão das armaduras. A corrosão da armadura é um dos principais mecanismos de deterioração em estruturas de betão, especialmente em ambientes agressivos como áreas costeiras.

Este trabalho teve como principais objetivos a investigação da durabilidade do betão, como é que os cloretos afetam essa durabilidade, com foco nas variáveis da espessura de recobrimento (com recobrimento de 1.5 e 3 cm) e a contaminação por cloretos.

O estudo foi realizado por meio de ensaios experimentais que avaliam a resistência do betão à penetração de cloretos e ensaios eletroquímicos para monitorar o potencial de corrosão das armaduras.

**Palavras-chave:** Betão armado; Penetração de cloretos; Corrosão das armaduras; Resistência do betão; Durabilidade; Recobrimento.



## **ABSTRACT**

The durability of concrete is one of the main factors that determine the service life of reinforced concrete structures. Despite its high mechanical strength, concrete is a porous material that can allow the penetration of aggressive agents, such as chlorides and carbon dioxide, which are the main contributors to the corrosion of reinforcements. Reinforcement corrosion is one of the primary deterioration mechanisms in concrete structures, especially in aggressive environments such as seaside areas. The main objectives of this study were to investigate the durability of concrete and how chlorides affect its durability, focusing on variables such as cover thickness (with 1.5 cm and 3 cm cover) and chloride contamination.

The study was conducted through experimental tests that assess the resistance of concrete to chloride penetration and electrochemical tests to monitor the corrosion potential of the reinforcements.

**Keywords:** Reinforced concrete; Chloride penetration; Reinforcement corrosion; Concrete resistance; Durability; Cover.



## **AGRADECIMENTOS**

Expresso os meus agradecimentos ao Professor Doutor Carlos Manuel da Silva Félix por me ter orientado e estar sempre disponível para me ajudar.

Agradeço à Eng.ª Cristina Alves Ribeiro pela disponibilidade, colaboração, persistência de me encorajar a fazer sempre melhor.

Agradeço aos meus pais pelo amor, carinho e por me terem apoiado durante esta fase, sem eles nada seria possível.

Agradeço ao meu namorado João pelo amor, apoio e compreensão nos momentos mais difíceis.

E não podia de deixar de agradecer aos meus amigos por estarem sempre presentes.



## Conteúdo

<b>Resumo .....</b>	<b>v</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>vii</b>
<b>Agradecimentos.....</b>	<b>ix</b>
<b>Índice de Figuras .....</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Tabelas .....</b>	<b>xix</b>
<b>Capítulo 1     <b>Introdução.....</b></b>	<b>1</b>
<b>1.1     Considerações Iniciais .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2     – Objetivos.....</b>	<b>1</b>
<b>1.3     – Estrutura da dissertação .....</b>	<b>2</b>
<b>Capítulo 2     <b>Estado de arte .....</b></b>	<b>5</b>
<b>Capítulo 3     <b>Durabilidade de uma estrutura de betão .....</b></b>	<b>15</b>
<b>3.1     Betão .....</b>	<b>17</b>
3.1.1     Componentes do betão.....	17
Ligante hidráulico.....	18
Agregados .....	18
Água da amassadura .....	18
Adjuvantes.....	19
<b>3.2     Degradação de uma estrutura .....</b>	<b>19</b>
3.2.1     Fase de iniciação.....	20
3.2.2     Fase de propagação .....	23
3.2.3     Carbonatação .....	24
3.2.4     Ataque por cloretos .....	25
<b>3.3     Mecanismos de penetração .....</b>	<b>27</b>
3.3.1     Difusão .....	28
3.3.2     Capilaridade ou Absorção Capilar.....	28
3.3.3     Permeabilidade.....	29
<b>Capítulo 4     <b>Ensaio Experimentais.....</b></b>	<b>31</b>
<b>4.1     Ensaio – Potencial de Corrosão .....</b>	<b>31</b>
4.1.1     Introdução.....	31

4.1.2	Metodologia do ensaio.....	32
4.1.3	Procedimento de medição.....	33
<b>4.2</b>	<b>Ensaio – Resistividade Elétrica .....</b>	<b>34</b>
<b>4.3</b>	<b>Ensaio – Determinação do teor de cloretos na massa de betão.....</b>	<b>35</b>
4.3.1	Procedimento de ensaio.....	35
<b>4.4</b>	<b>Ensaio de Absorção de água por capilaridade.....</b>	<b>36</b>
4.4.1	Procedimento de ensaio.....	36
<b>4.5</b>	<b>Ensaio de absorção de água por imersão .....</b>	<b>36</b>
4.5.1	Procedimento do ensaio.....	37
<b>4.6</b>	<b>Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário.....</b>	<b>37</b>
	Procedimento do ensaio.....	38
<b>4.7</b>	<b>Ensaio – Resistência à compressão .....</b>	<b>39</b>
	Introdução.....	39
	Procedimento do ensaio.....	39
<b>Capítulo 5</b>	<b><i>Caso de Estudo.....</i></b>	<b>41</b>
<b>5.1</b>	<b> Materiais utilizados .....</b>	<b>42</b>
<b>5.2</b>	<b> Procedimento experimental .....</b>	<b>43</b>
5.2.1	Desenvolvimento de cada cenário .....	44
	Cenário 1.....	44
	Cenário 2.....	45
	Cenário 3.....	45
<b>Capítulo 6</b>	<b><i>Análise dos resultados Obtidos.....</i></b>	<b>47</b>
<b>6.1</b>	<b> Ensaios de caracterização do betão .....</b>	<b>47</b>
6.1.1	Ensaio de absorção de água por capilaridade e imersão.....	47
6.1.2	Ensaio de difusão de cloretos .....	49
6.1.3	Ensaio de Carbonatação .....	51
6.1.4	Ensaio resistividade elétrica .....	52
6.1.5	Ensaio de resistência à compressão .....	53
6.1.6	Ensaio de teor de cloretos .....	56
6.1.7	Potencial de corrosão.....	60
<b>Capítulo 7</b>	<b><i>Conclusões .....</i></b>	<b>69</b>
<b>7.1</b>	<b> Conclusões gerais.....</b>	<b>69</b>

<b>7.2</b>	<b>Desenvolvimentos futuros.....</b>	<b>70</b>
	<b><i>Referências Bibliográficas.....</i></b>	<b>72</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Parâmetros utilizados em cada grupo (Kim <i>et al.</i> , 2014)	6
Figura 2.2 - Proporções utilizadas nas vigas (Kim <i>et al.</i> , 2014)	6
Figura 2.3 - Potencial de corrosão em vigas com fissuras (A/C =0.55 e Recobrimento = 30 mm)(Kim <i>et al.</i> , 2014)	7
Figura 2.4 - Potencial de corrosão em diferentes tipos de A/C (Kim <i>et al.</i> , 2014)	8
Figura 2.5 - Parâmetros da preparação da mistura e parâmetros definidos para cada caso (Hussain, 2011)	9
Figura 2.6 - Resumo das proporções dos materiais do betão(M.H.F. Medeiro <i>et al.</i> , 2017)	11
Figura 2.7 - Influência do recobrimento no potencial de corrosão(M.H.F. Medeiro <i>et al.</i> , 2017)	13
Figura 3.1 - Relação entre a NP EN 206 e as normas de projeto e de execução dos materiais constituintes e de ensaio, em Portugal (CEN - Comité Européen Normalisation, 2021)	16
Figura 3.2 - Vida útil de uma estrutura de betão armado - Modelo de tuuti ((João Miguel Espírito Santo Silva, 2014)	20
Figura 3.3 - Efeito da relação água/cimento na permeabilidade.(Júlio Appleton, 2013)	21
Figura 3.4 - Período de iniciação (Júlio Appleton, 2013)	23
Figura 3.5 - Mecanismo da corrosão das armaduras (Júlio Appleton, 2013)	23
Figura 3.6 - Avanço da frente de carbonatação (Júlio Appleton, 2013)	25
Figura 3.7 - Mecanismo de transporte numa estrutura de betão em ambiente marítimo(João Miguel Espírito Santo Silva, 2014)	26
Figura 3.8 - Risco de iniciação de corrosão em função do teor de cloretos(João Miguel Espírito Santo Silva, 2014)	27
Figura 3.9 - Classificação da qualidade do betão de acordo com o coeficiente de absorção (GORETI SOFIA MARQUES DE SÁ SILVA, 2010)	29
Figura 4.1 - Processo para ocorrer o potencial de corrosão (Canin+, Proceq, Analisador de Corrosão)	32

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.2 - Equipamento e execução do ensaio de potencial de corrosão.	32
Figura 4.3 – Circuito do eléctrodo (ASTM-C873-15)	33
Figura 4.4 - Mapeamento do Potencial de corrosão (ASTM, 2017)	34
Figura 4.5 -Máximo teor de cloretos no betão segundo a classe de teor de cloretos (CEN - Comité Européen Normalisation, 2021)	35
Figura 4.6 - Ensaio de resistência à compressão	39
Figura 4.7 - Roturas satisfatórias de provetes cúbicos (NP 12390-3:2011)	40
Figura 4.8 - Roturas não satisfatórias de provetes cúbicos (NP 12390-3:2011)	40
Figura 5.1 - Provetes após moldagem	41
Figura 5.2 -Características do cimento SECIL (SECIL, maio 2018)	43
Figura 6.1 - Gráfico obtido através dos resultados da Tabela 6.1	48
Figura 6.2 - Ensaio de carbonatação na amostra 1	51
Figura 6.3 - Ensaio de carbonatação amostra 2	52
Figura 6.4 - Ensaio de carbonatação amostra 3	52
Figura 6.5 - Resultados obtidos no ensaio de resistência compressão (Amostra 1)	54
Figura 6.6 - Resultados obtidos no ensaio de resistência compressão (Amostra 2)	55
Figura 6.7 - Resultados obtidos no ensaio de resistência compressão (Amostra 3)	56
Figura 6.8 - Resultados obtidos pelo ensaio de teor de cloretos (Amostra 1)	57
Figura 6.9 - Resultados obtidos pelo ensaio de teor de cloretos (Amostra 2)	58
Figura 6.10 - Resultados obtidos pelo ensaio de teor de cloretos (Amostra 3)	59
Figura 6.11 - Varões de aço retirados do prisma da amostra 1, no qual a sua cura foi realizada em água normal	61
Figura 6.12 -Amostra 1: Recobrimento 1.5 cm	61
Figura 6.13 - Amostra 1: Recobrimento 3.0	61
Figura 6.14 - Resultados obtidos no ensaio de potencial de corrosão (Amostra1)	62
Figura 6.15 - Varões de aço retirados dos provetes da amostra 2, no qual a sua cura foi realizada em água do mar	62
Figura 6.16 - Amostra 2: Recobrimento 1.5 cm	63

Figura 6.17 - Amostra 2 - Zonas de maior contaminação (Recobrimento 1.5)	64
Figura 6.18 - Amostra 2: Recobrimento 3.0 cm	64
Figura 6.19 - Amostra 2 - Zonas de maior contaminação (Recobrimento 3.0 cm)	64
Figura 6.20 - Resultados obtidos no ensaio de potencial de corrosão (Amostra2)	65
Figura 6.21 - Varões de aço retirados dos provetes da amostra 3, no qual a sua cura foi realizada em água do mar	65
Figura 6.22 -Amostra 3: Recobrimento 1.5 cm	66
Figura 6.23 – Amostra 3 - Zonas de maior contaminação (Recobrimento 1.5 cm)	66
Figura 6.24 - Amostra 3: Recobrimento de 3.0 cm	66
Figura 6.25 - Amostra 3 – Zonas com maior contaminação (Recobrimento 3.0 cm)	67
Figura 6.26 - Resultados obtidos pelo ensaio de potencial de corrosão (Amostra 3)	68



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 - Classificação do coeficiente de permeabilidade em função da qualidade do betão(João Miguel Espírito Santo Silva, 2014) .....	30
Tabela 5.1 - Materiais e quantidades.....	42
Tabela 5.2 - Cenário 1 .....	44
Tabela 5.3 - Cenário 2 .....	45
Tabela 5.4 - Cenário 3 .....	46
Tabela 6.1 - Resultados obtidos no ensaio por capilaridade.....	48
Tabela 6.2 - Resultados obtidos através do ensaio de absorção por imersão .....	49
Tabela 6.3 - Resultados obtidos através do ensaio de difusão de cloretos (Amostra 1) .....	50
Tabela 6.4 - Ensaio da resistividade elétrica - Resultados .....	53
Tabela 6.5 - Resultados da amostra 1 - Ensaio à compressão.....	53
Tabela 6.6 - Resultados da amostra 2 - Ensaio à compressão.....	54
Tabela 6.7 - Resultados da amostra 3 - Ensaio à compressão.....	55
Tabela 6.8 - Resultados do ensaio de penetração de cloretos (valores em %) (Amostra1).....	57
Tabela 6.9 – Resultados obtidos pelo ensaio de teor de cloretos (valores em %) (Amostra 2) .....	58
Tabela 6.10 - Resultados obtidos ensaio de teor de cloretos (valores em %) (Amostra 3) .....	59











# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A durabilidade do betão é um fator crucial na engenharia civil, determinando a longevidade e a integridade estrutural de construções em diversos ambientes. Desde a sua invenção no século XIX por Joseph-Louis-Lambot, o betão armado tornou-se um material estrutural predominante, apreciado por sua resistência mecânica, versatilidade e custo-benefício. Entretanto, o conceito inicial de que o betão armado seria um material quase eterno foi desafiado pela realidade das estruturas modernas, que enfrentam um envelhecimento e deterioração prematuros. (MAFALDA VALADAS CODER BARBOSA, 2013a)

A principal causa desta deterioração é a corrosão das armaduras de aço incorporadas no betão, um processo que compromete a capacidade de carga e a integridade das estruturas. (TIAGO MANUEL HELENO DOS SANTOS, 2014) Esta corrosão é frequentemente promovida por agentes agressivos como cloretos e dióxido de carbono, que penetram no betão e desencadeiam reações químicas que degradam a camada protetora das armaduras.

A importância de compreender e melhorar a durabilidade do betão não pode ser subestimada. As deteriorações prematuras das estruturas de betão armado não só acarretam elevados custos de reparação e reabilitação, mas também apresenta riscos significativos à segurança pública. Adicionalmente, os impactos ambientais associados ao ciclo de vida reduzido das estruturas reforçam a necessidade de práticas de construção mais sustentáveis e duráveis. (TIAGO MANUEL HELENO DOS SANTOS, 2014)

### 1.2 – OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho foi investigar e perceber como é que a durabilidade de uma estrutura de betão armado era afetada pela penetração dos cloretos.

## *CAPÍTULO 1*

Para se entender melhor este processo foram moldados provetes de betão (com incorporação de varões de aço) com o objetivo de se realizarem ensaios que permitam avaliar em que medida as condições de cura e o recobrimento, podem afetar o ataque de cloretos, principalmente em estruturas que se localizam perto da zona marítima.

Para se compreender como a cura pode influenciar a durabilidade do betão armado, foi realizado cura em água normal e cura em água do mar.

Para aprofundar o estudo, para além dos diferentes tipos de cura, foi colocado sal numa das amassaduras de betão realizadas, para simular a presença de cloretos nos constituintes do betão.

Foram considerados, diferentes recobrimentos, um recobrimento com 1.5 cm e outro de 3.0 cm. É importante perceber até que ponto o aumento do recobrimento se traduz num real aumento de proteção das armaduras.

O controlo da evolução da corrosão das armaduras por penetração de cloretos na massa de betão, foi realizado através do ensaio de determinação do potencial de corrosão. Este ensaio é importante porque se trata de um ensaio não destrutivo que fornece informação sobre o estado de corrosão das armaduras. Foi realizado o ensaio de determinação do teor de cloretos na massa de betão a diferentes profundidades com o objetivo de se compreender a evolução da penetração de cloretos nos elementos de betão.

Foram realizados ensaios complementares para caracterização do betão em termos de resistência à absorção de água e à difusão de cloretos, para melhor compreender os resultados obtidos nos ensaios anteriormente mencionados.

A preparação deste trabalho começou na unidade curricular de Projeto Integrado (Proji), foi proposto a continuidade deste projeto por ser um tema de grande relevância. O projeto teve início na empresa SENQUAL(Vanessa Oliveira, 2021) onde decorreu durante o período de mestrado.

### **1.3 – ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

A presente dissertação está dividida em 8 capítulos, que se focam nos objetivos principais deste trabalho e estão resumidos abaixo:

No Capítulo 1 (Introdução) faz-se o enquadramento do tema do projeto.

No Capítulo 2 (Estado de arte) é apresentado algumas investigações realizadas no mesmo âmbito de forma a ajudar na interpretação de resultados.

No Capítulo 3 (Durabilidade) são apresentados subcapítulos no qual

No Capítulo 4 (Ensaio experimental), neste capítulo são mencionados os ensaios realizados, o seu método e o procedimento.

No Capítulo 5 (Caso de Estudo), neste capítulo será referido o caso de estudo, como foi realizado e os procedimentos.

No Capítulo 6 (Análise dos resultados obtidos) neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no caso de estudo.



## Capítulo 2

### ESTADO DE ARTE

A durabilidade do betão é afetada por diversas ações de origem física, química, biológica e mecânica. De entre as várias ações, a corrosão das armaduras, induzida pela carbonatação ou pelo ataque de cloretos, é um dos mecanismos de degradação mais relevantes no betão armado.

A corrosão das armaduras de aço em estruturas de betão armado é um dos maiores desafios à durabilidade e à manutenção de estruturas de betão. Em ambientes mais agressivos como em áreas costeiras, a penetração de cloretos no betão é algo bastante preocupante, pois este leva à corrosão das armaduras, comprometendo a estrutura.

A corrosão das armaduras de aço ocorre principalmente devido à penetração de iões agressivos, tais como os cloretos, que se infiltram pelo betão até atingir as armaduras de aço, fazendo com que estas destruam os componentes dos mesmos. No presente trabalho serão abordadas apenas as questões referentes à penetração de cloretos em betões. (João Miguel Espírito Santo Silva, 2014).

Neste capítulo será realizado um enquadramento teórico da temática abordada, principalmente de ensaios realizados em laboratório com o objetivo de se conseguir obter maiores conclusões acerca da temática presente neste trabalho.

Yun Yong Kim et al. (Kim *et al.*, 2014), desenvolveram um estudo onde o objetivo foi perceber como a corrosão das armaduras era prejudicada pela penetração de cloretos, com diferentes recobrimentos, diferentes relações água/cimento (A/C) e com diferentes larguras de fissuras. Para acompanharem os resultados destes ensaios, utilizaram o método do potencial de corrosão. Para acelerarem o processo de corrosão utilizaram sal em spray para que a penetração fosse mais rápida.

Realizaram vários provetes, com dimensões de 150x150x600 mm, com diferentes tipos de recobrimento (30 e 60 mm), diferentes relações de A/C (0.35, 0.55 e 0.70) e larguras de fissura (0-1.5 mm). Utilizaram cimento Portland comum, areia de rio (agregado fino) e brita (agregado grosso). As proporções das misturas variaram conforme a relação A/C. As fissuras foram induzidas nas vigas de betão através de ensaio de flexão em três pontos, após um período de cura de 28 dias. Para a realização deste ensaio utilizaram um transdutor de deslocamento linear, que ajudou a monitorar a largura das fissuras durante o ensaio. A pulverização do sal em spray, foi realizada com uma solução de NaCl a 5% que foi alternada com ciclos de secagem, com duração de 5,5 horas para cada ciclo. A temperatura foi mantida a 40°C durante o teste. Esse ciclo de pulverização foi repetido ao longo de 35 dias, simulando aproximadamente 9,4 anos de exposição de uma estrutura próxima ao litoral (250 metros de distância). Na Figura 2.1 e Figura 2.2 são ilustrados os parâmetros utilizados e as proporções realizadas. Na Figura 2.1 são apresentados os 3 cenários que serão realizados para a investigação. A Figura 2.2 ilustra os componentes e as respetivas massas utilizadas no processo.

**Table 1**  
Influencing parameters for SST.

Group	Considerations
A	Constant: w/c 0.55, cover depth 30 mm Variation parameter: crack width (0.0–1.5 mm)
B	Constant: w/c 0.55 Variation parameter: cover depth(30 and 60 mm), crack width (0.0–1.0 mm)
C	Constant: 30 mm Variation parameter: crack width (0.0–1.0 mm), w/c (0.35–0.70)

Figura 2.1 - Parâmetros utilizados em cada grupo (Kim *et al.*, 2014)

**Table 2**  
Mix proportions for RC beams.

Case	w/c	S/a <sup>a</sup> (%)	Unit content (kg/m <sup>3</sup> )				S.P. <sup>b</sup>
			Water	Cement	Sand	Gravel	
A	0.35	39.5	171.5	490.1	639.7	998.7	0.2% of cement wt.
B	0.55	43.5	171.5	311.9	768.5	1017.4	
C	0.70	48.2	186.0	266.0	902.0	969.0	

<sup>a</sup> S/a: sand to total aggregate ratio.

<sup>b</sup> S.P.: Super plasticized.

**Table 3**  
Physical properties of aggregates for RC beams.

Type	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Maximum size of aggregate (mm)	Absorption (%)	F.M. <sup>a</sup>
Sand	2570	5	0.74	2.57
Gravel	2620	19	0.53	6.72

<sup>a</sup> Fineness modulus.

Figura 2.2 - Proporções utilizadas nas vigas (Kim *et al.*, 2014)

As medições do potencial de corrosão foram realizadas em pontos fixos ao longo das vigas, focando na influência das larguras das fissuras, da profundidade de recobrimento e da relação A/C. Foram usados elétrodos de referência para medir o potencial de corrosão nos varões de aço embutidos. As medições foram realizadas regularmente ao longo de todo o período de ensaio para avaliar a evolução da corrosão.

Após a conclusão do teste de 35 dias, os resultados do HCP (Half Cell Potential) foram comparados com uma análise de penetração de cloretos, utilizando o programa "Life-365™" para prever a profundidade necessária de cobertura de betão que garantiria condições anticorrosivas.

Neste artigo as conclusões que foram obtidas, tendo como variável a largura das fissuras e utilizando o método do potencial de corrosão, este (potencial de corrosão) aumenta com a profundidade das fissuras. Observaram um aumento de 34-42% para fissuras de 1.5mm enquanto em fissuras de 1.0mm verificaram um aumento de 24% e em fissuras de 0.5mm um aumento entre 14-16%.(Kim *et al.*, 2014). A\_Figura 2.3 ilustra o a relação do potencial de corrosão com a largura das fissuras, sendo possível concluir que as fissuras que apresentavam larguras acima de 1.0 mm o potencial era maior.

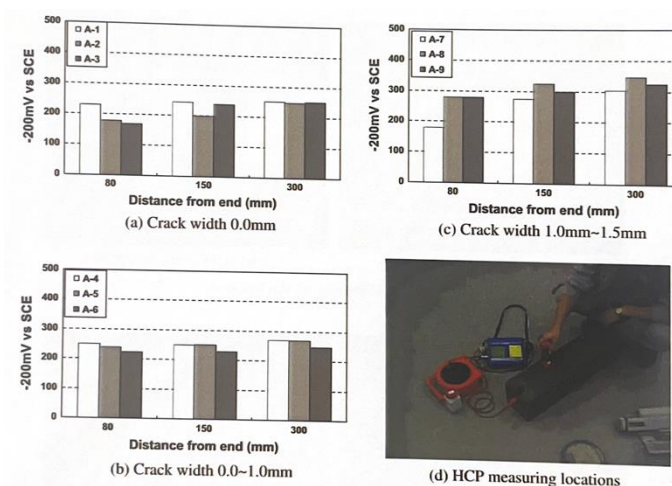


Figura 2.3 - Potencial de corrosão em vigas com fissuras (A/C =0.55 e Recobrimento = 30 mm)(Kim *et al.*, 2014)

Em relação à distância da armadura à face, verificaram que quanto menor fosse o recobrimento menor era o valor do potencial e que ia aumentando o potencial quanto maior fosse o recobrimento. Mas após a fissuração concluíram que esse recobrimento não era suficiente para impedir a entrada de cloretos.

No que diz respeito à relação A/C (como esta ilustrado na Figura 2.4) foi possível concluir que quanto maior relação A/C maiores são os níveis de corrosão e maior é a extensão dessa corrosão nas armaduras. Ou seja, na relação A/C de 0.7 existiu uma maior penetração de cloretos.

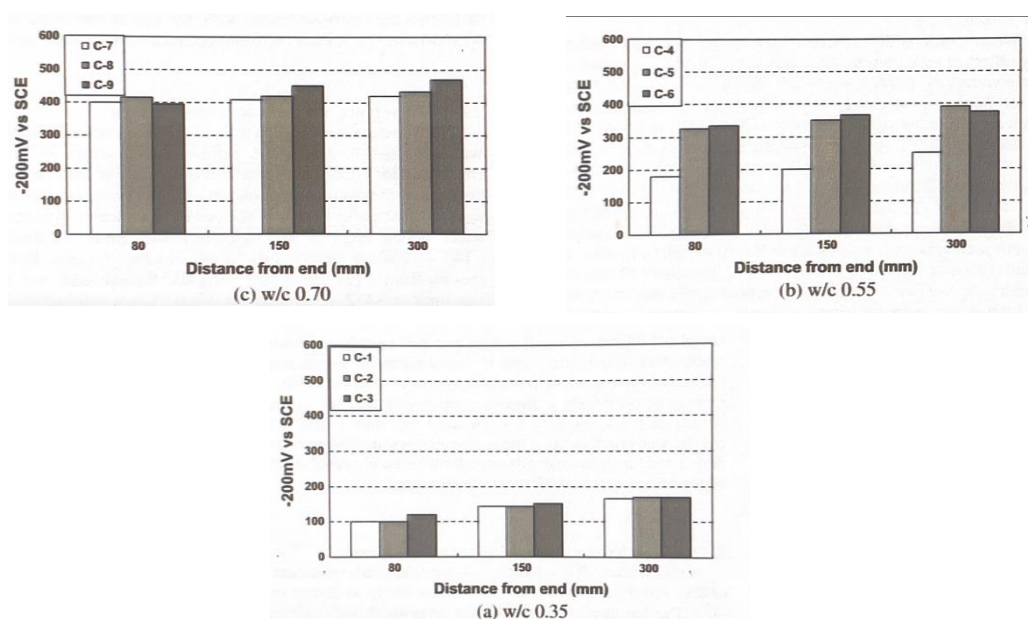


Figura 2.4 - Potencial de corrosão em diferentes tipos de A/C (Kim *et al.*, 2014)

Os resultados obtidos foram também avaliados no software, software “LIFE-365™”, e concluíram que os resultados eram bastante diferentes entre os diferentes métodos (Kim *et al.*, 2014). A avaliação realizada pelo software, um método que consideraram mais conservador, que considera que a partir de  $1.2\text{kg/m}^3$  já existe penetração de cloretos, enquanto no outro método acima de  $-350\text{ mV}$  existe 90% de probabilidade de existir penetração de cloretos.

Ao explorar as conclusões obtidas neste artigo foi possível concluir que é importante considerar um recobrimento mais elevado para a proteção das armaduras de aço e que quanto menor o a relação de A/C melhor será a minimização de possíveis ataques. É importante fazer análises às estruturas para as proteger de possíveis fissuras que possam existir nas estruturas, protegendo

assim as mesmas. Embora técnicas como o potencial de corrosão ofereçam uma avaliação prática e acessível a combinação com outros métodos, no caso deste artigo o software “LIFE-365,<sup>TM</sup>” pode fornecer uma abordagem mais completa para o controlo e a previsão da corrosão em betão armado. (Kim *et al.*, 2014).

Num outro artigo, realizado por Raja Rizwan Hussais (Hussain, 2011), no qual também ele realizou provetes com o objetivo de estudar o potencial de corrosão, mas investigando o potencial de corrosão em relação a diferentes condições de cura.

O estudo foi realizado para diferentes tipos de composição de materiais e em quatro condições ambientais, tais como ar seco, submersos, humidade relativa e em ciclos de molhagem e secagem. Foram utilizados os mesmos parâmetros que foram utilizados no artigo anterior (profundidade de recobrimento, relação A/C), para além desses a humidade e o teor de cloretos. Os provetes realizados apresentavam dimensões de 200x140x150 mm, com dois varões de aço embutidos, estas foram protegidas nas extremidades para se garantir maior certeza nos valores das medições. Os varões apresentam um diâmetro de 13 mm. Foram realizados provetes de betão com diferentes A/C, tais como 0.35, 0.45 e 0.55. Para a realização do betão foi utilizado um cimento Portland comum. Para induzir a corrosão, foi adicionado uma solução de cloretos (NaCl) as misturas de betão com diferentes concentrações de cloretos (1%, 5% e 10% em relação à massa). A Figura 2.5 apresenta os casos e as quantidades usadas em cada para a realização do ensaio.

Case#	W/C	Binder, $\frac{kg}{m^3}$ (lb/ft <sup>3</sup> )	Water, $\frac{kg}{m^3}$ (lb/ft <sup>3</sup> )	Fine agg., $\frac{kg}{m^3}$ (lb/ft <sup>3</sup> )	Coarse agg., $\frac{kg}{m^3}$ (lb/ft <sup>3</sup> )
1, 2, 3, 5, 10	0.3	555 (34.648)	167 (10.425)	654 (40.827)	980 (61.179)
9	0.45	371 (23.16)	167 (10.425)	756 (47.195)	1031 (64.363)
4,6,7,8	0.55	303 (18.915)	167 (10.425)	801 (50.004)	1043 (65.112)

Case no.	Concrete cover mm (in.)	W/C ratio	Total chloride (% mass of binder)
1	25 (0.984)	0.3	5
2	40 (1.575)	0.3	5
3	70 (2.755)	0.3	5
4	25 (0.984)	0.55	1
5	25 (0.984)	0.3	1
6	25 (0.984)	0.55	5
7	40 (1.575)	0.55	5
8	70 (2.755)	0.55	10
9	40 (1.575)	0.55	5
10	70 (2.755)	0.3	10

Figura 2.5 - Parâmetros da preparação da mistura e parâmetros definidos para cada caso (Hussain, 2011)

As amostras foram expostas às diferentes condições de exposição ambiental por seis meses e um ano. Após esses períodos, as medições de potencial de corrosão foram analisadas para avaliar o progresso da corrosão.

Neste artigo foram realizadas quatro condições (como referidas anteriormente) ambientais diferentes, tais como, exposição ao ar seco (humidade relativa de 60%), exposição submersa em água, exposição em ambiente com 95% de humidade relativa e Exposição de ciclos de molhagem e secagem, com períodos de molhagem de 30 dias e secagem de 15 dias. A temperatura foi mantida constante a 20°C durante todo o período de ensaio. (Hussain, 2011)

As conclusões que se obtiveram neste artigo foram que quando os provetes estão submersos e se retiram as leituras do potencial de corrosão são mais elevados do que quando os provetes se encontram ao ar. Estes valores são mais negativos quanto menor é a percentagem de cloretos introduzida (1-5%). Estes valores começam a estabilizar ao longo do tempo, mas mesmo assim permanecem mais elevados nestas condições do que ao ar. Quando a concentração de cloretos é mais alta (10%), o valor do potencial de corrosão não excede os -700 mV, independentemente se para além dos cloretos, já introduzidos previamente, possam existir mais depois da submersão dos provetes em água. Mostrando que possa existir um limite nas medições do potencial de corrosão.

Como neste estudo foram realizados ciclos de molhagem e secagem é possível comparar os valores, sendo que os resultados mostram que existe variações significativas no potencial de corrosão, apresentando quedas repentinas logo após a cada ciclo de molhagem (5 dias em ciclo de molhagem de 30 dias), exceto no primeiro ciclo, provando que a humidade influencia os resultados que podem ser obtidos. Estes valores são mais significativos especialmente em provetes com recobrimentos mais finos.

Analisando as diferentes condições de ambiente é possível concluir que nos provetes em ambientes de molhagem e secagem o aumento da corrosão é maior do que em qualquer outro ambiente. Seguem-se os provetes submersos, enquanto as amostras expostas a condições de humidade relativa (95%) e ao ar apresentam valores de corrosão mais baixos. Ao longo do processo existiram pequenas variações devido ao ataque não uniforme e não controlado de cloretos, em zonas em que os varões de aço se encontravam expostos.

Através deste artigo é possível compreender que a humidade tem uma grande influência nos resultados do potencial de corrosão, afetando os resultados obtidos e dessa forma fazendo com que a interpretação dos mesmos nem sempre seja o mais correto. Como já mencionado nas

conclusões do artigo anterior o recobrimento tem uma grande influência nos resultados obtidos, mostrando que quanto maior o recobrimento maior será a sua resistência em relação à penetração de cloretos.(Hussain, 2011)

Medeiros et al. (M.H.F. Medeiro *et al.*, 2017)

Como nos anteriores foi investigado o potencial de corrosão em relação ao recobrimento, relação A/C e a cura do betão.

Para este estudo foram realizados 12 provetes prismáticos (15 x 15 x 45 cm) com diferentes proporções de betão (1:3, 1:4, 1:5), cada um deles dotado de varões de aço. Inicialmente os provetes estiveram em cura na camara húmida durante 70 dias e posteriormente mantidos em ambiente laboratorial por mais 28 dias para secagem. A espessura do recobrimento foi de exatamente 1 cm e de 3 cm. As relações A/C utilizados foram 0.43, 0.50 e 0.59. Em relação à cura dos provetes, estes foram sujeitos a diferentes tipos de cura dividido por fases. Na primeira fase, foram colocados em camara húmida no qual os provetes foram curados com 95% de humidade relativa e uma temperatura controlada de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Este período de cura que durou 70 dias, teve como objetivo que o provete tivesse um elevado grau de hidratação para simular estruturas que já estão construídas há muitos anos. A segunda fase de cura foi a secagem em ambiente laboratorial com temperatura de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  e com uma humidade relativa entre os 65% e os 75%, ficaram nestas condições por mais 27 dias (do 71<sup>o</sup> até aos 98 dias). Na terceira fase, após 1 ano de moldagem, os provetes foram submetidos a imersão em água durante dois dias. O objetivo deste tipo de cura é simular as condições de campo, onde as estruturas são expostas a este ciclo no dia a dia.(M.H.F. Medeiro *et al.*, 2017). A Figura 2.6 ilustra o resumo das proporções usadas para a realização do betão em cada caso.

m	Cimento	Arela	Brita	a/c	Slump (mm)	Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência à compressão (MPa)	Massa específica do concreto (kg/m <sup>3</sup> )
3	1	1,08	1,92	0,43	105	540	50	2390
4	1	1,60	2,40	0,50	90	421	41	2315
5	1	2,12	2,88	0,59	95	346	30	2280

Figura 2.6 - Resumo das proporções dos materiais do betão(M.H.F. Medeiro *et al.*, 2017)

As medições foram realizadas em três fases diferentes, aos 70 dias com cura húmida, aos 98 dias com secagem controlada e após um ano com molhagem/secagem. Para a realização do

método usaram a ASTM C 876:2015, utilizando um voltímetro de alta impedância (>20 MΩ) e eletrodos de cobre/sulfato de cobre. Foram realizadas 12 leituras por provete.

As conclusões que são possíveis retirar analisando o que escreveram (M.H.F. Medeiro *et al.*, 2017), primeiramente em relação à humidade foi possível perceber que quando a humidade interna era maior (ou seja, quando os provetes tiveram em cura na câmara húmida os 70 dias) os valores do potencial de corrosão foram mais negativos, valores a cima dos -350 mV, mas após a secagem em ambiente controlado, estes valores tenderam a diminuir, mostrando que quanto mais seco se encontrasse o provete, menos negativo os valores da corrosão seriam mostrando que era possível que não estivesse a ocorrer corrosão nas armaduras.

Através dos resultados obtidos pela relação A/C, também foi possível perceber que nos provetes com 1% de cloretos e com uma maior relação de A/C, mais negativo é o potencial de corrosão. Mas analisando os provetes que não apresentavam qualquer tipo de cloretos induzidos essa relação já não foi tão clara.

Analisando em relação aos recobrimentos foi possível concluir que, na presença de cloretos, um maior recobrimento se traduz em valores de potencial menos negativos. Ou seja, em provetes contaminados com cloretos os valores de potencial no recobrimento de 3.0 cm foram mais baixos, provando que o recobrimento protege as armaduras, reduzindo a probabilidade de corrosão. Mas nos provetes que não foram contaminados com cloretos, os recobrimentos não tiveram influências significativas nas medições do potencial de corrosão. Analisando a Figura 2.7, é possível concluir que os provetes com contaminação por cloretos tiveram um comportamento claro de corrosão, estes provetes apresentaram potenciais de corrosão significativamente mais negativos e com uma probabilidade de corrosão de 90%. É possível concluir que os cloretos induzidos romperam a camada passiva das armaduras, sendo mais fácil iniciar o processo de corrosão.

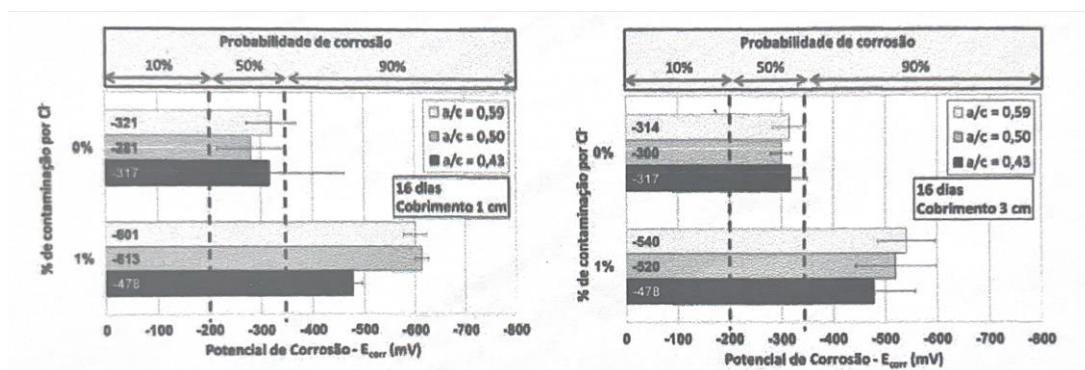


Figura 2.7 - Influência do revestimento no potencial de corrosão(M.H.F. Medeiro *et al.*, 2017)



## Capítulo 3

### DURABILIDADE DE UMA ESTRUTURA DE BETÃO

Entende-se como durabilidade de uma estrutura, a sua capacidade em cumprir os requisitos para o qual foi projetada, tais como estética, funcionalidade, segurança, durante o período de vida previsto, suportando qualquer fenómeno provocado pelos agentes agressivos do meio envolvente, cumprindo ainda assim as propriedades estipuladas no projeto de engenharia. Os materiais usados e as quantidades de cada material são muito importantes, mas para além dos materiais a cura do betão também o é, e são todos estes conjuntos que fazem a diferença na durabilidade final e na vida útil do betão (Júlio Appleton, 2013).

O projeto de estruturas de betão armado foca-se sobretudo na resistência estrutural, não tendo em igual consideração a componente temporal de desempenho e a diversidade de condições ambientais. Deste modo, destacam-se inúmeros casos de deterioração prematura das estruturas de betão armado, nomeadamente em ambiente marítimo, circunstância que tem forçado a especificação de requisitos de durabilidade.

Através da definição e imposição de requisitos mínimos relativos à constituição e propriedades de desempenho do betão, as especificações supracitadas detêm a finalidade de auxiliar os projetistas na conceção de estruturas para uma vida útil de 50 e/ou 100 anos, embora a normalização por si só não garanta tais períodos (MAFALDA VALADAS CODER BARBOSA, 2013).

Na Figura 3.1 são esquematizados os principais documentos normativos envolvidos na conceção, projeto, especificação da composição, propriedades de desempenho e controlo da execução em estruturas de betão armado.

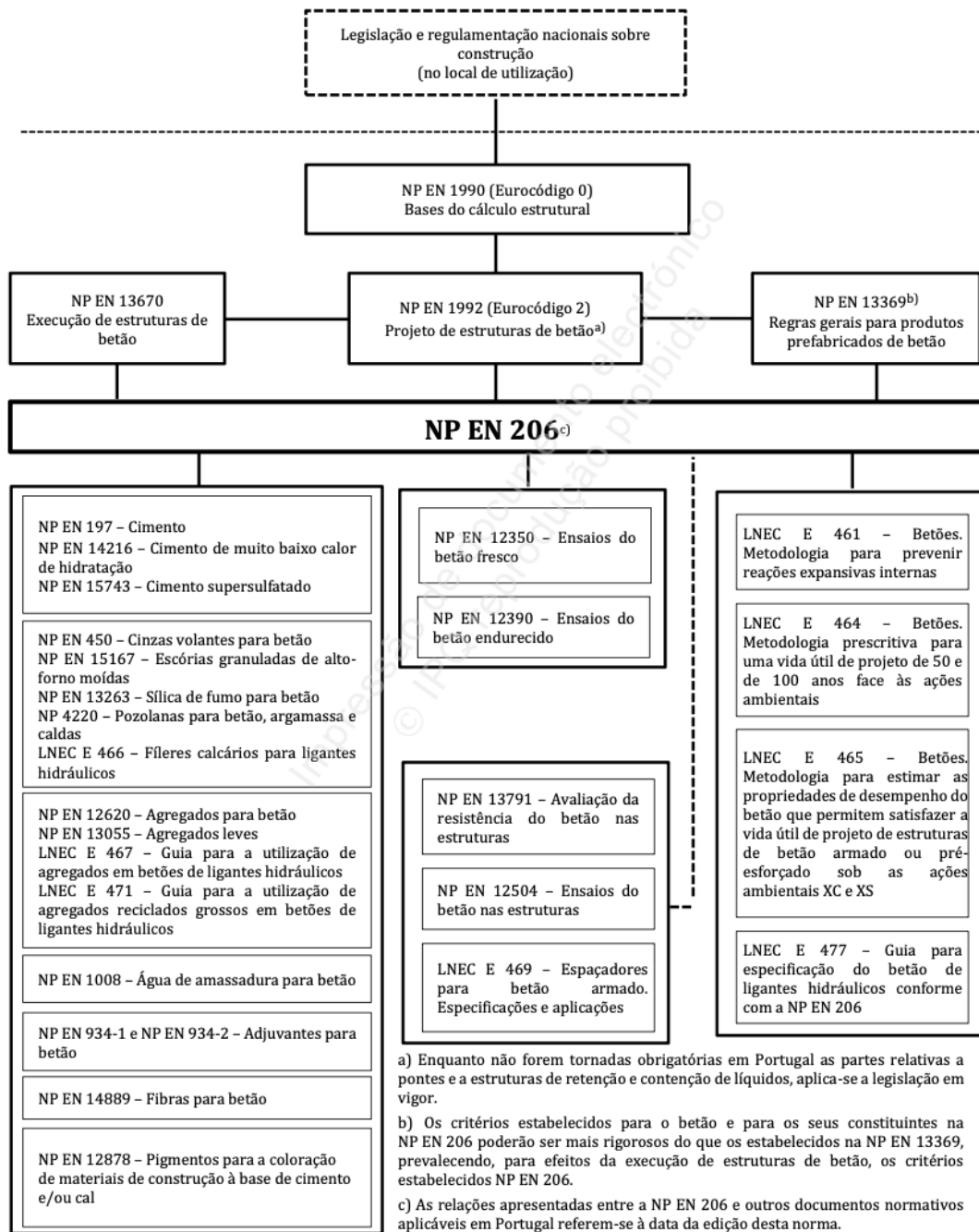


Figura 3.1 - Relação entre a NP EN 206 e as normas de projeto e de execução dos materiais constituintes e de ensaio, em Portugal (CEN - Comité Européen Normalisation, 2021)

De forma a alcançar durabilidade e desempenho de longa duração numa estrutura de betão armado é fundamental, para além da conceção estrutural, ponderar a qualidade e espessura do betão de recobrimento, evitar os mecanismos de degradação da estrutura, isolando a agressividade do meio envolvente e seleccionar composições de materiais e detalhes construtivos, em função do ambiente em que se integra e dos agentes agressivos suscetíveis de a deteriorar (Júlio Appleton, 2013).

### 3.1 BETÃO

O betão é um dos materiais da construção mais versáteis e amplamente utilizados no mundo. Sua história remonta ao século XIX, quando Joseph-Louis Lambot desenvolveu o betão armado, revolucionando a engenharia civil e abrindo caminho para inúmeras inovações arquitetônicas e infraestruturais. Desde então, o betão tornou-se o alicerce de edificações, pontes, barragens, ruas, estação de tratamento de águas e entre muitas outras. (João Miguel Espírito Santo Silva, 2014)

A popularidade do betão pode ser atribuída a várias características intrínsecas que o tornam ideal para aplicações estruturais. Primeiramente, a combinação de cimento, agregados e água resulta em um material que, ao endurecer, adquire uma resistência à compressão excepcional. Além disso, a maleabilidade do betão fresco permite que ele seja moldado em praticamente qualquer forma, oferecendo grande liberdade arquitetônica e de funcionalidade.

Além de sua resistência e versatilidade, o betão também é valorizado por sua durabilidade e baixo custo de produção. A disponibilidade abundante dos materiais constituintes e a simples tecnologia de produção contribuem para a sua economia. No entanto, a verdadeira força do betão reside na sua capacidade de incorporar armaduras de aço, que combinam com a resistência à compressão do betão, com a resistência à tração do aço, formando um material composto que pode suportar diversas cargas e condições ambientais. (MAFALDA VALADAS CODER BARBOSA, 2013a)

Apesar das suas muitas vantagens, a durabilidade das estruturas de betão é uma preocupação constante, especialmente em ambientes agressivos onde a corrosão das armaduras pode comprometer a integridade estrutural. O estudo e desenvolvimento de novos aditivos, técnicas de cura e métodos de prevenção de corrosão são áreas de estudo contínua, visando prolongar a vida útil das estruturas de betão e reduzir custos de manutenção.

#### 3.1.1 Componentes do betão

O betão tem uma composição básica que consiste em uma mistura de cimento, agregados e água, que, quando combinados, formam um material rígido e robusto após a cura. Cada componente desempenha um papel específico e essencial na determinação das propriedades finais do material, influenciando a sua resistência, trabalhabilidade, durabilidade e comportamento sobre as diversas condições ambientais.

O betão é constituído por 7% a 15% de cimento, de 60% a 75% de agregados e 14% a 21% de água. Para além destes constituintes ainda podem ser adicionados adjuvantes (MAFALDA VALADAS CODER BARBOSA, 2013a). Compreender a função e a interação entre esses constituintes é vital para a produção do betão de alta qualidade para que este cumpra os requisitos específicos de cada projeto.

As especificações para os constituintes do betão estão presentes na Norma EN NP 206\_2013+A2\_2021.

### **Ligante hidráulico**

O ligante hidráulico é constituído por partículas muito pequenas, que em contacto com água, formam uma pasta com capacidade de aglomerar materiais (agregados), em que o endurecimento pode ocorrer tanto ao ar livre como em meio húmido.

A designação de ligante deve-se a propriedades que têm de aglomerar uma porção elevada de materiais inertes, como areias, pedra britada, etc., conferindo ao conjunto grande coesão e resistência, tornando-o apto a ser utilizado na construção como argamassas e betões.

O cimento portland é considerado um ligante hidráulico, e é um material heterógeno resultante de uma mistura de vários elementos. O cimento portland é obtido a partir de uma mistura devidamente proporcional, de calcário (carbonato de cálcio), argila (silicatos de alumínio e ferro) e, eventualmente, outros constituintes ricos em sílica, alumina, entre outros.

### **Agregados**

Como é o constituinte com mais percentagem na composição do betão, é importante uma correta seleção dos mesmos. Estes devem consistir apenas em partículas com adequada resistência às condições de exposição e não devem conter materiais que possam provocar a deterioração do betão. A granulometria do material é importante para que a pasta seja eficiente.

Os agregados estão geralmente divididos em dois grupos: finos e grossos. Os agregados finos são as areias naturais ou fabricadas, no qual a partícula grossa tem dimensões superior a 5mm, enquanto a partícula fina tem dimensões inferiores a 5 mm. (João Miguel Espírito Santo Silva, 2014).

A máxima dimensão do agregado é um conceito essencial na tecnologia do betão, na medida em que permite aceitar ou rejeitar o material em função da geometria das peças a betonar e das características da armadura das mesmas. Este conceito é definido pela menor abertura da malha do peneiro da série através da qual passa uma quantidade de agregado igual ou superior a 90% (Valadas Coder Barbosa et al., 2013).

### **Água da amassadura**

A água é um constituinte essencial do betão, que quando é misturada com o cimento forma uma pasta que une todos os agregados. O betão endurece pelo processo de hidratação, causado pela adição da água. Este processo de hidratação consiste na reação química que ocorre entre o cimento e a água, para formar produtos de hidratação do cimento.

A água de amassadura desempenha dois papéis importantes na massa fresca e na fase de endurecimento do betão. No betão fresco, a água confere à massa a trabalhabilidade adequada para permitir uma boa

colocação e compactação. Na fase de endurecimento a água participa nas reações de hidratação do cimento que conferem a resistência necessária ao betão, como mencionado anteriormente.

Deve-se limitar ao mínimo a quantidade de água utilizada no fabrico de betão, pois a água em excesso evapora-se criando no betão uma rede de poros capilares que prejudicam a sua resistência e durabilidade.

A quantidade de água a utilizar deverá ser a indispensável para se obter a trabalhabilidade pretendida. Refira-se que com o desenvolvimento dos adjuvantes com elevado desempenho é atualmente possível utilizar quantidades muito pequenas de água no fabrico do betão sem prejudicar a trabalhabilidade.(Valadas Coder Barbosa et al.,2013)

### **Adjuvantes**

Os adjuvantes são produtos que são adicionados em pequenas quantidades referidas à massa de cimento (< 5%), antes ou durante a amassadura, provocando as modificações requeridas das propriedades normais do betão fresco ou endurecido.(João Miguel Espírito Santo Silva, 2014)

Os adjuvantes têm um papel importante, pois permitem reduzir a água de amassadura sem prejudicar a trabalhabilidade. Estes adjuvantes são designados por redutores de água, distinguindo-se dois tipos: os plastificantes e os superplastificantes.

A atuação destes produtos no betão pode ser resumida da seguinte forma: (MAFALDA VALADAS CODER BARBOSA, 2013a)

- Redução da tensão superficial da água, aumentando a sua capacidade de espalhamento sobre as superfícies das partículas e o seu poder de penetração
- Efeito lubrificante, diminuindo o atrito existente entre as partículas finas e entre esta e a água
- Efeito dispersor e desfloculante devido à absorção das moléculas do adjuvante pelas partículas sólidas que as torna eletricamente carregadas e assim repelentes.

Enquanto nos plastificantes o efeito lubrificante é preponderante, nos superplastificantes o efeito dispersor é predominante

## **3.2 DEGRADAÇÃO DE UMA ESTRUTURA**

A prevenção da corrosão das armaduras inicia-se na fase de projeto, quando a estrutura é concebida e os cálculos estruturais são efetuados, utilizando um betão de boa qualidade (razão A/C, tipo de dosagem de cimento, etc.), por forma a atingir uma reduzida permeabilidade e elevada resistividade elétrica, aliadas à seleção de uma suficiente espessura de recobrimento, com a finalidade de proporcionar a devida proteção às armaduras.

O controlo e garantia de qualidade nas operações de cofragem, associados a uma adequada colocação, compactação, metodologia e período de cura constituem fatores imprescindíveis na garantia do desenvolvimento de todas as características e propriedades pretendidas para o betão. Como prática complementar, subsiste a possibilidade de serem utilizadas medidas especiais de proteção do betão e das armaduras, as quais não deverão ser aplicadas como alternativa à mencionada qualidade e espessura do recobrimento.

Os principais mecanismos de deterioração das estruturas de betão armado são a corrosão das armaduras e o ataque químico do betão. (Júlio Appleton, 2013)

É normal distinguirem-se duas fases, uma que conduz à despassivação das armaduras e outra que corresponde ao processo de corrosão, estas designadas por fase de iniciação e fase de propagação.

Foi proposto um modelo, o modelo de Tuutti, exibido na Figura 3.2, que é o modelo que se considera representativo do mecanismo da corrosão das armaduras, no qual a vida útil de uma estrutura de betão armado é subdividida em duas fases: período de iniciação ( $t_i$ ) e período de propagação ( $t_p$ ).

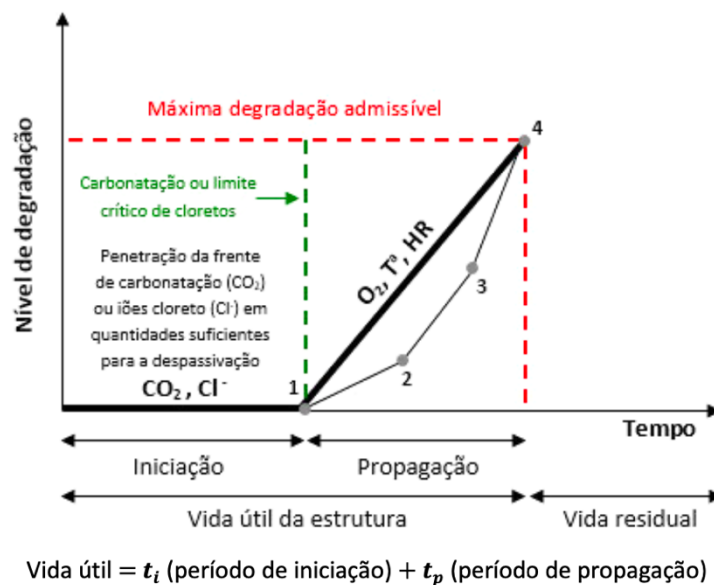


Figura 3.2 - Vida útil de uma estrutura de betão armado - Modelo de tuutti ((João Miguel Espírito Santo Silva, 2014)

### 3.2.1 Fase de iniciação

A fase de iniciação pode ocorrer através de dois mecanismos a carbonatação do betão e a penetração de cloretos. (Júlio Appleton, 2013)

A carbonatação é o fenômeno natural de difusão de anídrico carbônico, nos poros do betão, onde este reage com o hidróxido de cálcio dando origem à formação de carbonato de cálcio. O consumo de hidróxido de cálcio origina uma redução do pH.

A penetração de cloretos, nomeadamente os presentes na água do mar e na atmosfera junto à orla marítima, ocorre por absorção, difusão e permeação.

A fase de propagação é a que afeta principalmente a estrutura de betão, é a fase onde os mecanismos, (a carbonatação e a penetração de cloretos) são cruciais na vida útil de uma estrutura.

A maior ou menor velocidade de penetração dessas substâncias depende das condições de exposição, as quais influenciam os mecanismos de transporte, da qualidade do betão, existência ou não de materiais de revestimento e proteção das superfícies de betão. A resistência à penetração depende da composição do betão, da sua colocação em obra e da cura.

Dos vários parâmetros que influenciam essas características as principais são as relações água/ligante (A/L) ou água/cimento (A/C) (Figura 3.3), dado que quanto maior for essa relação, pior será a qualidade do betão. O melhor valor de relação existente para a produção de um bom betão é de 0.4 ou 0.5, para ambientes muito agressivos é desejável adotar valores inferiores a 0.4. (Júlio Appleton, 2013). Valores acima de 0.6 não é possível afirmar que o betão terá uma boa qualidade.

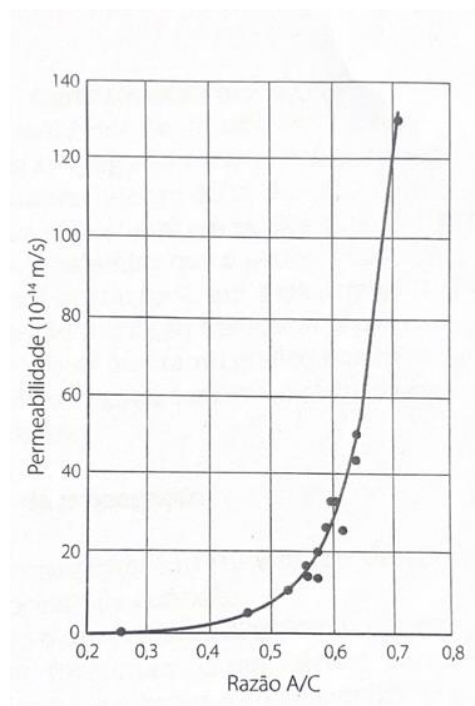


Figura 3.3 - Efeito da relação água/cimento na permeabilidade. (Júlio Appleton, 2013)

A penetração de dióxido de carbono depende também do grau de humidade do betão. Se o betão se encontrar bastante saturado a penetração de dióxido de carbono será muito lenta, mas se pelo contrário este se encontrar seco a penetração será bastante rápida.

Estando a carbonatação associada à reação com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento, quanto maior a dosagem de cimento maior será a resistência à carbonatação.

É normal que quanto maior for a distância das armaduras em relação ao recobrimento, maior será o tempo até que a penetração de substâncias agressivas atinja as armaduras.

O teor em iões cloreto em profundidade designa-se por perfil de cloretos. (Júlio Appleton, 2013). Os cloretos depositados na camada superficial do betão penetram para o interior por um processo de difusão e de absorção. Trata-se de mecanismos de transporte muito distintos, sendo a absorção um mecanismo rápido e a difusão um mecanismo lento.

A velocidade de penetração é maior quando os ciclos de molhagem/secagem com água salgada uma vez que este processo origina uma maior acumulação de cloretos na camada superficial e uma maior penetração por absorção.

Quando o teor crítico de cloretos livres atinge uma certa concentração ao nível das armaduras a sua proteção é destruída (despassivação) e as armaduras podem sofrer o mecanismo de corrosão. No ambiente marítimo a velocidade de carbonatação é lenta devido ao teor de humidade do betão ser elevado, mas a ação dos cloretos é suficiente para despassivar as armaduras.

A velocidade de penetração dos cloretos é, em geral, para um mesmo betão mais rápida do que a penetração de carbonatação.

Em termos de tempo, o período de iniciação da carbonatação é muito superior ao período de iniciação associado à penetração de cloretos, como é ilustrado na Figura 3.4.

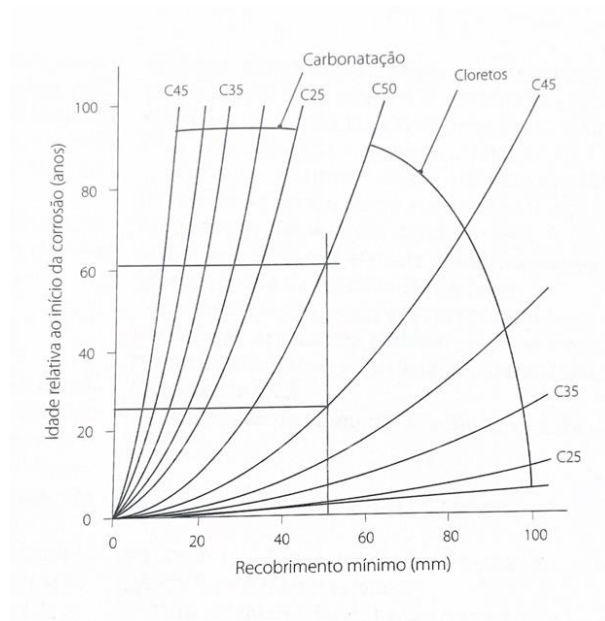


Figura 3.4 - Período de iniciação (Júlio Appleton, 2013)

### 3.2.2 Fase de propagação

Esta fase é a fase em que o processo de corrosão começa a ocorrer. A corrosão é um processo eletroquímico em que as armaduras funcionam como ânodos, cátodos e condutor elétrico e o betão como eletrólito. (Figura 3.5) (Júlio Appleton, 2013)

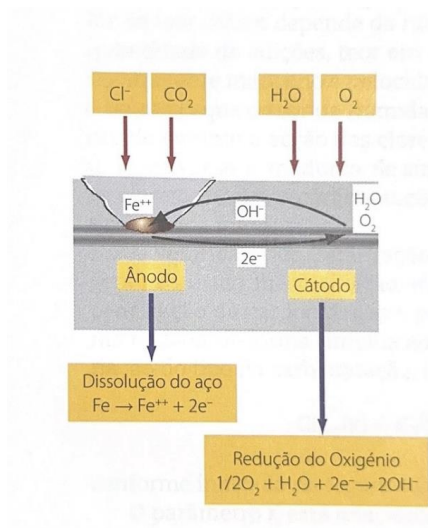


Figura 3.5 - Mecanismo da corrosão das armaduras (Júlio Appleton, 2013)

No ânodo formam-se óxidos e hidróxidos de ferro. Para se desenvolver a corrosão é necessário que as armaduras estejam despassivadas e que a esse nível exista a presença de humidade e de oxigénio.

Se o betão está seco, não funciona como eletrólito, se o betão está saturado não há acesso de oxigénio ao nível da armadura e não ocorrem as reações catódicas. A velocidade de corrosão depende de numerosos parâmetros (Júlio Appleton, 2013). A velocidade associada à corrosão induzida pela ação dos cloretos é de 50 a 1000  $\mu\text{m}/\text{ano}$ , enquanto a velocidades associadas à despassivação das armaduras devido à carbonatação é de 10 a 100  $\mu\text{m}/\text{ano}$ .

A qualidade do betão, em relação à resistividade, influencia também muito significativamente a velocidade de corrosão. A humidade relativa e a permeabilidade podem ou não facilitar o acesso de oxigénio até ao nível das armaduras. Podendo influenciar a velocidade de corrosão.

A resistividade relaciona-se também com a velocidade de corrosão. Se a resistividade é baixa, a velocidade de corrosão é alta. Mas se a resistividade é muito baixa a velocidade de corrosão é muito alta. Mas a resistividade é muito baixa porque o teor de humidade é muito elevado e a resistividade deixa de controlar a velocidade da corrosão.

A corrosão pode apresentar-se sob duas formas, corrosão generalizada (associado à carbonatação) e corrosão localizada (associada à presença de cloretos).

A corrosão produz efeitos nefastos nas estruturas de betão quer sobre o ponto de vista estético quer relativamente à sua capacidade resistente.

A corrosão está associada à formação de óxidos e hidróxidos de ferro, cujo volume pode atingir 7 vezes o volume dos produtos iniciais. (Júlio Appleton, 2013) Este volume pode expandir de tal maneira o betão que é capaz de ocorrer fendilhação podendo ocorrer exposição de armaduras e delaminação. Neste processo a armadura perde seção e ductilidade e a aderência aço-betão é fortemente afetada.

Os processos de deterioração do betão armado ou pré-esforçado ocorrem normalmente devido a alterações das suas características, tanto a nível mecânico, químico e físico, e podem surgir tanto no interior como na superfície ou podem ocorrer em simultâneo.

As alterações que possam surgir no betão podem ter origem em defeitos, danos e deterioração. Alguns dos sintomas, resultantes das alterações são: a fendilhação, deformações, desgaste, corrosão, desagregação, delaminação, infiltrações, eflorescências e assentamentos.

### **3.2.3 Carbonatação**

O dióxido de carbono encontra-se presente no ar e na água. No caso do dióxido de carbono no ar, a concentração de dióxido de carbono varia com a localização, ou seja, em zonas rurais é cerca de 0.03%, num laboratório não ventilado pode atingir 0.1% e em grandes cidades o valor medio é de 0.3%, podendo excecionalmente atingir 1% por unidade de volume. (João Miguel Espírito Santo Silva, 2014). Em tuneis rodoviários, não ventilados, são locais onde as superfícies de betão estão em contacto com elevadas

concentrações de dióxido de carbono. O dióxido de carbono difunde-se pelo betão devido a reações químicas que ocorre na película de água situada nas paredes dos poros entre o dióxido de carbono e os hidróxidos do betão, mas principalmente com o hidróxido de cálcio.

Das reações entre o dióxido de carbono e os hidróxidos, resulta o carbonato de cálcio que pode apresentar três formas cristalográficas, a aragonite, a vaterite e a calcite. A forma mais comum é a calcite.

A carbonatação por si só não causa deterioração do betão, mas tem efeitos importantes sobre este, nomeadamente a retração por carbonatação e a diminuição do pH da solução contida nos poros. O pH do betão situa-se entre os 12.6 a 13.5 e é reduzido para menos de 9 devido ao fenómeno da carbonatação. No caso de todo o hidróxido de cálcio ser carbonatado o valor de pH é reduzido para 8.3 (Figura 3.6).

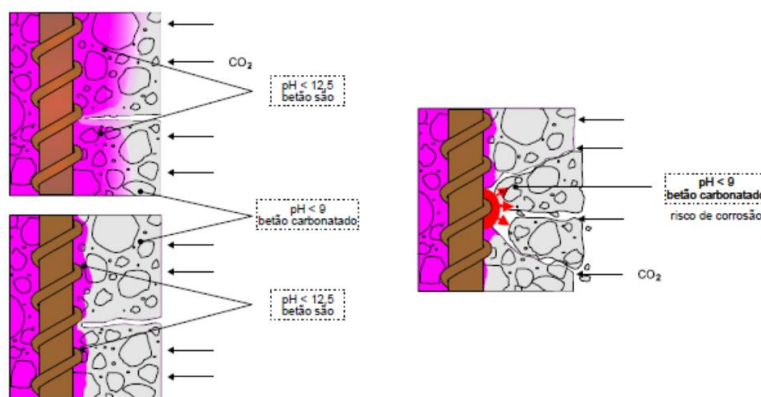


Figura 3.6 - Avanço da frente de carbonatação (Júlio Appleton, 2013)

### 3.2.4 Ataque por cloretos

Os cloretos provocam uma dissolução localizada na camada passiva, dando lugar a ataques denominados por localizados (picaduras), que podem reduzir drasticamente a secção do aço, num curto espaço de tempo. Os cloretos podem estar presentes no betão, porque penetram desde o exterior (fonte externa), no caso de estruturas em contato com o mar/ ou próximas da costa, ou devido a utilização de sais de gelo. Os cloretos também podem estar presentes no betão (fonte interna), porque foram adicionados na produção deste, ou seja, nas matérias-primas (aditivos, água, cimento e agregados).

Como acontece na carbonatação, os cloretos também precisam da presença da água na estrutura porosa do betão, para poderem penetrar para o interior destes.

Dependendo das condições ambientais, a penetração pode ocorrer segundo os seguintes mecanismos de transporte (João Miguel Espírito Santo Silva, 2014): Permeação (Permeabilidade), Sucção Capilar e Difusão. Estes mecanismos encontram-se descritos no ponto 3.3 deste trabalho. Importa realçar que estes mecanismos normalmente não atuam sozinhos, mas em conjunto, mas isso vai depender do tipo de

exposição a que a estrutura esta sujeita. Na Figura 3.7 é possível visualizar os vários mecanismos de transporte que atuam numa estrutura em ambiente marítimo.

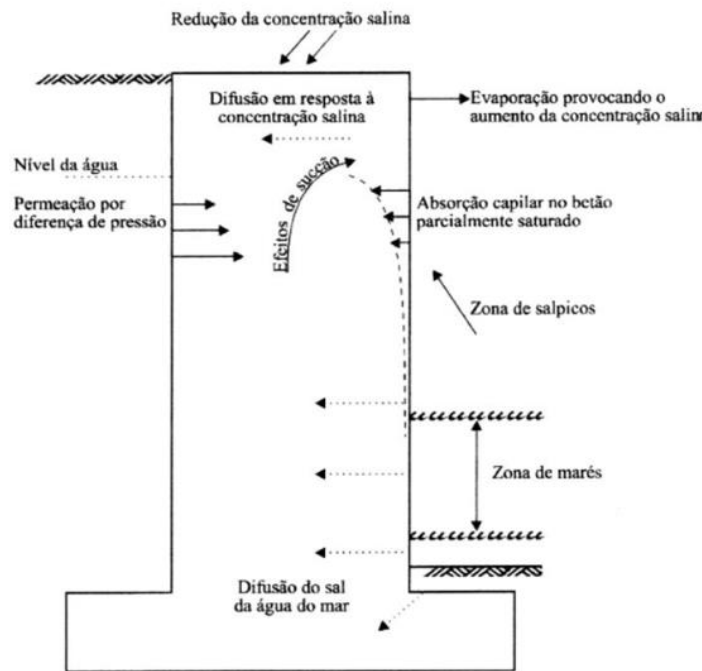


Figura 3.7 - Mecanismo de transporte numa estrutura de betão em ambiente marítimo(João Miguel Espírito Santo Silva, 2014)

Em zonas marítimas ou próximas da orla marítima, normalmente ocorre deposição de cloretos na superfície do betão, quer por contacto ou salpicos, no caso de zonas costeiras, ou pelo vento em zonas mais distantes da orla marítima.

Os cloretos no interior do betão podem encontrar-se em três diferentes estados(João Miguel Espírito Santo Silva, 2014): uma parte dos cloretos encontra-se quimicamente ligado com os produtos resultantes da hidratação, outra parte encontra-se fisicamente ligado, ou seja, adsorvidos na superfície dos poros de gel, e os restantes encontra-se livres na solução dos poros. São estes últimos, os denominados “cloretos livres”, que podem causar a rotura da película passiva das armaduras.

Normalmente não é determinado o teor de cloretos livres contidos no interior do betão. O que é feito normalmente é a determinação do teor de cloretos totais contidos no interior do betão. Este valor é regularmente apresentado em forma de percentagem relativamente à massa de cimento.

É necessário um determinado teor de cloretos, denominado como teor crítico, para ocorrer a despassivação das armaduras e assim se iniciar o processo de corrosão. No entanto, existe muita discussão em torno desse valor crítico. A razão para essa controvérsia é porque não é apenas a concentração de iões de cloreto livres contidos na solução dos poros que determina a destruição da película passiva, mas também a relação entre os iões de cloreto livres e os restantes iões presentes na

solução. Na Figura 3.8 é possível verificar o risco de corrosão de acordo com a percentagem de cloretos presentes no betão.

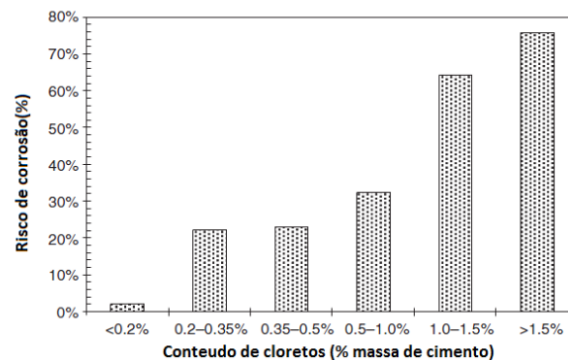


Figura 3.8 - Risco de iniciação de corrosão em função do teor de cloretos (João Miguel Espírito Santo Silva, 2014)

Os fatores que afetam a penetração dos cloretos no betão são praticamente os mesmos que condicionam a carbonatação, ou seja, a qualidade (razão A/C, tipo cura, composição) e espessura do recobrimento, e as condições de exposição, pois são estas que determinam quais os mecanismos de transporte e a velocidade dos mesmos.

O teor crítico de iões de cloreto é influenciado pela composição e quantidade de cimento, ou seja, pelo teor de aluminato tricálcico. Quanto maior for o teor de aluminato tricálcico menor será a velocidade de penetração, refletindo-se assim no aumento do teor crítico. É recomendável o uso de cimentos com elevado teor de aluminato tricálcico quando há risco de corrosão por cloretos, mas há que ter em atenção, a presença de sulfatos, pois estes reagem com os cloroaluminatos, libertando cloretos para solução aquosa, levando assim a uma diminuição do teor crítico.

### 3.3 MECANISMOS DE PENETRAÇÃO

A penetração de cloretos no betão é um fenómeno complexo que envolve vários mecanismos (como referido anteriormente). Estes dependem das condições de exposição, do teor de humidade do betão, da dimensão e continuidade da estrutura porosa, a penetração de iões cloreto no betão que pode ocorrer pelos seguintes mecanismos de transporte, tais como, difusão, capilaridade ou absorção capilar e permeabilidade (ÂNGELA ESTRELA LOPES AMARAL, 2012).

### 3.3.1 Difusão

A difusão é um processo que consiste no transporte de líquidos, gases ou iões devido ao gradiente de concentração. Mais concretamente o transporte faz-se de uma zona mais concentrada para uma menos concentrada, pois tende a equilibrar as concentrações no interior do betão.

O grau de saturação de água nos poros capilares tem extrema importância no processo de difusão. No caso dos gases, dióxido de carbono e oxigénio, o processo de difusão vai diminuindo à medida que os poros vão ficando saturados pela água. Este processo deixa praticamente de existir porque o betão fica totalmente saturado.

O coeficiente de difusão será maior na ausência de humidade relativa, mas é necessário uma quantidade mínima de água no interior para que as reações químicas se desenvolvam no interior do betão. Por exemplo é através da película de água (adsorvida à superfície do poro) que ocorre a dissolução do dióxido de carbono

O coeficiente de difusão de cloretos segundo a especificação do LNEC E463:2004.

Pode-se concluir que a humidade relativa tem um papel importante no processo de difusão, mas existem outros parâmetros, como é o caso da dimensão, continuidade, distribuição e tortuosidade da rede porosa (poros capilares). Nos poros de pequena dimensão, a difusão será afetada pelas colisões moleculares com as paredes dos poros (João Miguel Espírito Santo Silva, 2014)

### 3.3.2 Capilaridade ou Absorção Capilar

A capilaridade consiste na penetração de um fluido pela rede porosa do betão. O fenómeno dá-se devido ao aparecimento de forças capilares que tem origem na diferença de pressão entre superfície livre da água no exterior e a superfície da água no interior dos poros. A força capilar depende da dimensão dos poros, e será maior quanto menor forem os poros. Já a velocidade de ingresso é o oposto, ou seja, será maior quanto maiores forem os poros. A humidade do betão influencia a absorção capilar, pois se os poros estiverem saturados, o fenómeno não irá ocorrer, dado que não se desenvolvem forças de sucção capilar. Este fenómeno ocorre devido a ciclos de molhagem e secagem.

Na Figura 3.9 é possível observar uma possível classificação do betão preconizado pela Taywood Engineering Ltd, com duração de 270 minutos (GORETI SOFIA MARQUES DE SÁ SILVA, 2010).

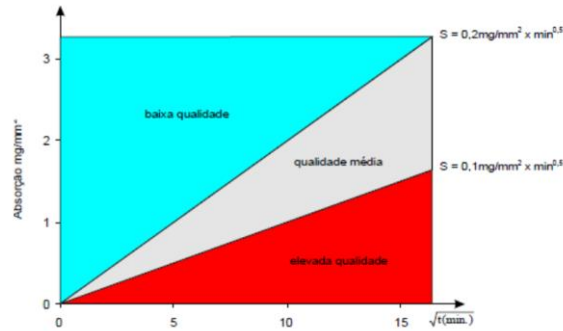


Figura 3.9 - Classificação da qualidade do betão de acordo com o coeficiente de absorção (GORETI SOFIA MARQUES DE SÁ SILVA, 2010)

Os resultados do coeficiente de absorção obtidos podem variar de acordo com a humidade inicial da amostra, como já referido, as forças capilares são influenciadas pela humidade.

Esta propriedade do betão é influenciada por diversos fatores (João Miguel Espírito Santo Silva, 2014), como o módulo de finura do cimento (o valor diminui quanto mais baixo for o módulo de finura) da razão água/cimento (aumenta quando há um aumento da razão água/cimento) do tempo de cura húmida (diminui com o aumento da duração), da idade e da compactidade.

A capilaridade é também influenciada pelo tipo e pelas propriedades (densidade, viscosidade e tensão superficial) do fluido.

### 3.3.3 Permeabilidade

A permeabilidade é um fenómeno no qual um fluido, gás ou líquido se irá deslocar nas redes de poros e fendas existentes no betão, por causa de um gradiente de pressão (gradiente hidráulico quando o betão está submerso). O movimento do fluido no interior do betão é condicionado pela viscosidade do próprio, do atrito, das interações físico-químicas entre o fluido e os minerais da pasta de cimento, da dimensão (reduzida) e tortuosidade dos poros e fissuras (João Miguel Espírito Santo Silva, 2014)

A água é o principal fluido para se deslocar por permeação e o seu movimento no interior do betão é relevante para a durabilidade do mesmo.

A permeabilidade à água é uma propriedade que nos dá informação da qualidade do betão, ou seja, da estrutura porosa, permitindo assim avaliar a capacidade impermeabilizante do betão.

A permeabilidade está associada à porosidade capilar e como esta, depende da razão A/C e do grau de hidratação.

### CAPÍTULO 3

Para além dos fatores mencionados anteriormente, a permeabilidade é ainda afetada por diversos fatores como o tipo de cura, a dosagem de cimento, a dimensão máxima do agregado (fenómeno de exsudação que fragiliza a ligação cimento inerte), etc. Na Tabela 3.1 serão apresentados os intervalos de permeabilidade em função da qualidade do betão.

Tabela 3.1 - Classificação do coeficiente de permeabilidade em função da qualidade do betão (João Miguel Espírito Santo Silva, 2014)

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

## Capítulo 4

### ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Em campanhas de inspeção e de avaliação da condição estrutural é extremamente importante, realizar ensaios ao betão, seja em betão recente ou betão antigo.

Estes ensaios têm em geral como objetivos principais o controlo de qualidade, monitorizar o estado de conservação do betão ao longo do tempo, analisar e interpretar eventuais ocorrências danos como a degradação do betão e o ataque químico, entre outros.

Neste capítulo serão abordados alguns ensaios experimentais que se realizaram no caso de estudo, quase todos ensaios não destrutivos com a exceção do ensaio de resistência à compressão.

#### 4.1 ENSAIO – POTENCIAL DE CORROSÃO

##### 4.1.1 Introdução

O ensaio do potencial de corrosão tem como objetivo determinar o potencial de corrosão nas armaduras em estruturas de betão armado. O princípio deste método é medir a diferença de potencial eletroquímico entre o aço e um elétrodo, permitindo avaliar a possível corrosão existente nas armaduras.

A medição do potencial de corrosão acontece quando o aço perde a camada passiva de óxido de ferro hidratado. Essa camada é decomposta pela reação que ocorre entre o betão e o dióxido de carbono atmosférico (carbonatação), ou pela penetração de substâncias agressivas, principalmente cloretos do sal. No ânodo, ions ferrosos ( $Fe^{++}$ ) são dissolvidos e eletrões são libertados, estes últimos penetram no aço até o cátodo, onde formam hidróxido ( $OH^-$ ) com a água e o oxigénio. Esse princípio cria uma diferença de potencial que é medido utilizando o método do potencial de corrosão (Figura 4.1).

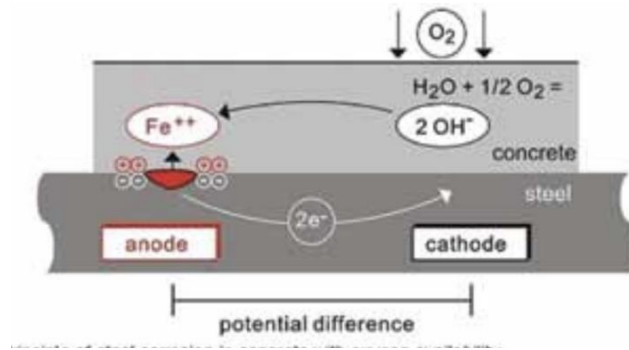


Figura 4.1 - Processo para ocorrer o potencial de corrosão (Canin+, Proceq, Analisador de Corrosão)

Este método tem como objetivo avaliar a corrosão nos varões de aço que se encontram inseridos no betão. Este ensaio foi realizado com base na norma ASTM C876-15.

#### 4.1.2 Metodologia do ensaio

A metodologia segue a norma que padroniza o procedimento para medir o potencial de corrosão em armaduras de betão armado. Primeiramente é necessário limpar a superfície do betão para que exista um contacto adequado entre o eléctrodo de referência e o eléctrodo de medição. O betão deve estar suficientemente húmido para permitir a condutividade eléctrica entre a armadura e o eléctrodo de referência.

Em seguida é necessário fazer a ligação entre o aparelho e o varão de aço, se não existir zonas expostas então pode ser necessário retirar um pouco do betão, e em seguida colocar o eléctrodo de referência (Figura 4.2).

Será necessário um voltímetro com uma capacidade de impedância, entre os 10MΩ e os 200MΩ, que é usado para medir a diferença de potencial entre o eléctrodo de referência e a armadura. A alta impedância garante que a corrente eléctrica entre os dois eléctrodos seja mínima, para que esta não altere o estado eletroquímico da armadura.



Figura 4.2 - Equipamento e execução do ensaio de potencial de corrosão.

### 4.1.3 Procedimento de medição

Inicialmente cria-se uma grelha da zona onde serão retirados os valores do potencial e em seguida, coloca-se o eléctrodo de referência na superfície do betão. Retiram-se os pontos marcados ao longo da estrutura, criando a grelha. Cada ponto é registado com a respetiva leitura do potencial.

O espaçamento entre as medições depende do tamanho da estrutura, mas estes valores devem ser de 1.2 m no máximo. Valores superiores a 1.2 m podem não capturar zonas com maior corrosão.

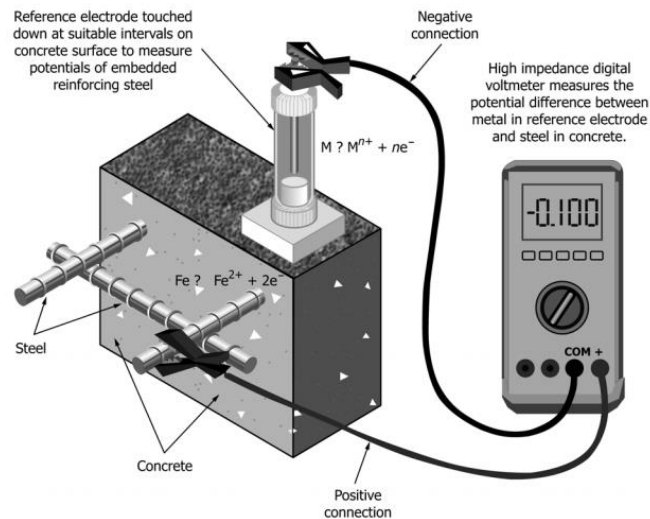


Figura 4.3 – Circuito do eléctrodo (ASTM-C873-15)

Os valores do potencial variam segundo as condições em que se encontra o betão. Segundo a ASTM C873-15 os valores de referência são: (ASTM, 2017)

- Valores inferiores a -350 mV indicam que existe uma probabilidade superior a 90% de estar a ocorrer corrosão das armaduras na zona ensaiada no momento do ensaio.
- Valores entre -200 mV e -350 mV indicam que a atividade corrosiva na zona ensaiada é incerta.
- Valores superiores a -200 mV indicam que existe uma probabilidade superior a 90% de não estar a ocorrer corrosão das armaduras na zona ensaiada no momento do ensaio.

O mapeamento das áreas onde as medições foram realizadas (Figura 4.4) ajuda a identificar zonas onde a corrosão é mais provável de estar a acontecer, ajudando em intervenções corretivas e preventivas.

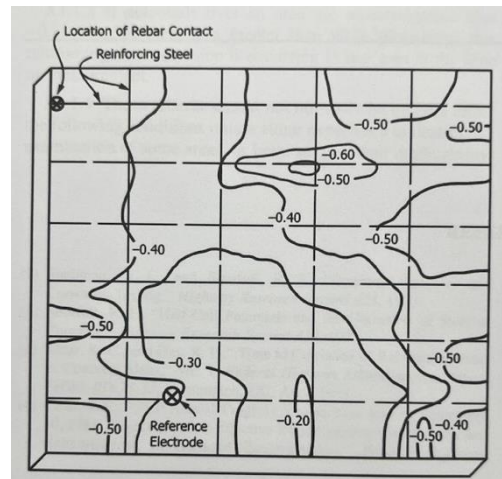


Figura 4.4 - Mapeamento do Potencial de corrosão (ASTM, 2017)

O ensaio mede apenas o potencial eletroquímico, e não a taxa de corrosão. Ou seja, o ensaio não identifica diretamente a quantidade de material corroído, mas indica onde a corrosão pode estar a ocorrer.

## 4.2 ENSAIO – RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Como descrito no ensaio acima, a corrosão é um processo eletroquímico, o fluxo entre as áreas anódica e catódica e, portanto, a taxa em que a corrosão pode ocorrer é afetada pela resistividade do betão.

A sonda Wenner é utilizada para medir a resistividade elétrica do betão. Uma corrente é aplicada as duas sondas externas e a diferença de potencial é a medida entre as duas sondas internas.

Os testes efetuados fizeram com que fosse possível perceber os limites para a determinação da probabilidade de estar a ocorrer corrosão. Esses valores são:

- Quando a resistividade é superior a 12 kΩcm é improvável que esteja a ocorrer corrosão;
- Quando a resistividade é inferior a 8 kΩcm é improvável que ocorra corrosão;
- Quando a resistividade é entre 8 – 12 kΩcm é possível que já esteja a correr corrosão;

A resistividade diminui devido ao maior teor de água no betão, maior porosidade do betão, temperatura mais alta, maior teor de cloreto e menor profundidade da carbonatação.

Quanto menor for a resistividade maior será a probabilidade de corrosão o mesmo acontece no inverso, quando a resistividade elétrica for alta, a probabilidade de corrosão diminui. (na Suíça, 2012)

### 4.3 ENSAIO – DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CLORETOS NA MASSA DE BETÃO

O ensaio de determinação de teor de cloretos tem como objetivo determinar a percentagem de cloretos no pó de betão recolhido. Este ensaio não é realizado apenas em betão endurecido, mas também pode ser realizado em betão fresco. Neste tipo de ensaio o erro associado é de aproximadamente ( $\pm 4\%$ ).

O ensaio do teor de cloretos tem a funcionalidade de determinar a percentagem do teor de cloretos solúveis, em diferentes idades e em diferentes profundidades. O limite de deteção neste ensaio é de 0.005%, nestes casos deve-se colocar <0.005.

Os resultados são expressos, normalmente, em percentagem do peso de betão, mas é possível determinar em percentagem do peso de cimento, neste último caso deve-se multiplicar o resultado pela razão entre o peso de betão e o de cimento.

A Figura 4.5 corresponde ao teor máximo de cloretos que é permitido na massa de cimento de acordo com a NP EN 206: 2013.

Utilização do betão	Classe de teor de cloretos <sup>a)</sup>	Máximo teor de Cl- por massa de cimento <sup>b)</sup> (%)
Sem armaduras de aço ou outros metais embebidos, com exceção de dispositivos de elevação resistentes à corrosão	Cl 1,00	1,00
Com armaduras de aço ou outros metais embebidos	Cl 0,20	0,20
	Cl 0,40 <sup>c)</sup>	0,40
Com aço de pré-esforço em contacto direto com o betão	Cl 0,10	0,10
	Cl 0,20	0,20

<sup>a)</sup> Para uma utilização específica do betão, a classe a aplicar depende das disposições válidas no local de utilização do betão.  
<sup>b)</sup> Quando forem utilizadas adições e estas forem consideradas para a dosagem de cimento, o teor de cloretos é expresso em percentagem de iões cloreto por massa de cimento mais massa total das adições que foram tidas em conta.  
<sup>c)</sup> No betão com CEM III e de acordo com disposições válidas no local de utilização do betão, poderão ser permitidas classes de teor de cloretos diferentes.

Figura 4.5 -Máximo teor de cloretos no betão segundo a classe de teor de cloretos (CEN - Comité Européen Normalisation, 2021)

#### 4.3.1 Procedimento de ensaio

São obtidas em provetes amostras de pó (1.5gr), a diferentes profundidades, que serão analisadas através do ensaio. Estas amostras de pó devem ser constituídas por material passado no peneiro 0.0063. Depois deste passo são colocadas em francos com uma solução que contém água, ácido acético e ácido nítrico. São colocados 10ml da solução mais os 1.5gr de pó. Esta solução fica a reagir com o pó da amostra durante 24h. Depois desta etapa é realizado o ensaio, que é executado com um eletrodo que lê os valores do teor de cloretos solúveis.

#### **4.4 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE**

Este ensaio é utilizado para avaliar a capacidade de um material de absorver água por meio dos poros. A realização deste ensaio é importante para a avaliação da durabilidade dos materiais de construção, uma vez que a água é o principal meio de transporte de agentes agressivos, como íões cloreto e sulfatos.

Os principais objetivos da avaliação da porosidade capilar do betão, que está diretamente relacionada com a sua permeabilidade e resistência aos ataques de agentes externos, é avaliar a durabilidade do betão ao determinar a quantidade de água que é absorvida e analisar o comportamento do betão em termos de absorção de água (GORETI SOFIA MARQUES DE SÁ SILVA, 2010).

Este ensaio é realizado segundo a norma NP EN 13057:2002.

##### **4.4.1 Procedimento de ensaio**

Para a realização deste ensaio, é necessário que os provetes, cilíndricos ou prismáticos, tenham a devida cura de 28 dias. As superfícies dos provetes devem ser limpas e secas, enquanto as faces laterais podem ser impermeabilizadas para ajudar a que a absorção de água ocorra apenas pela base do provete.

Primeiramente efetua-se uma pesagem com os provetes secos (massa inicial seca) e em seguida estes são colocados em contacto com a água, normalmente numa lâmina de água com 2 a 5 mm.

As medições dos provetes são efetuadas em intervalos de tempo específico (ex: 15min, 30min, 1h, 2h, 3h, 24h) para determinar a quantidade de água absorvida.

Por fim é calculada a taxa de absorção capilar que é calculada dividindo-se o aumento da massa (massa húmida menos a massa seca) pela área da superfície de absorção em determinado intervalo de tempo decorrido.(GORETI SOFIA MARQUES DE SÁ SILVA, 2010)

Este ensaio tem uma grande importância pois é fundamental para prever o comportamento do betão frente à exposição da humidade e agentes agressivos. Quando o betão tem uma grande capacidade de absorção capilar, então este terá mais problemas como corrosão das armaduras, carbonatação acelerada e deterioração.

#### **4.5 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO**

Recorre-se a este ensaio para medir a capacidade de absorção de água de um provete, quando este está completamente imerso. Este ensaio é utilizado no betão, como em argamassas, cerâmicas e em outros materiais porosos da construção, com o objetivo de avaliar a porosidade e a durabilidade. A quantidade de água absorvida está diretamente relacionada com a permeabilidade e a resistência do material em relação à ação de agentes agressivos.

Este ensaio tem como objetivo determinar a quantidade de água que um material poroso consegue absorver em condições de imersão, simulando situações em que a estrutura está em contacto prolongado com a água, avaliar a porosidade do material, que é quantidades de poros superficiais em contacto com a água, e concluir sobre a durabilidade do material, isto porque quanto maior absorção de água maior suscetibilidade à degradação, como por exemplo à corrosão das armaduras.

Este ensaio é realizado segundo a especificação LNEC E395-1993.

#### **4.5.1 Procedimento do ensaio**

Primeiramente os provetes tem uma cura de 28 dias e as superfícies devem ser limpas.

Em seguida as amostras são colocadas em estufa a uma temperatura controlada (geralmente  $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ ), até que se atinga massa constante. Em seguida são colocadas no excicador para arrefecerem e não absorverem humidade atmosférica.

A primeira pesagem é efetuada quando o provete já se encontra frio, esta primeiro valor será o valor de referência.

A partir de massa constante, os provetes são totalmente imersos em água num período de 24h. Após este período o provete é retirado e é retirado o excesso de água com um pano húmido. As amostras são pesadas e obtemos a massa do provete húmido.

Em seguida é determinado o valor da absorção da água que é calculado através da percentagem do aumento da massa em relação à massa seca.

O valor obtido da absorção de água indica a quantidade de água que o material pode absorver em relação à massa seca. Materiais de baixa porosidade, como betão de alta densidade ou cerâmicas compactas, tendem a apresentar baixas taxas de absorção. Já materiais mais porosos, como betão leve ou materiais mal compactados, podem exibir altos valores de absorção.

Este ensaio é essencial para se perceber a resistência à penetração de água em materiais porosos. Quando uma estrutura se encontra demasiado tempo exposta à chuva, ambientes marinhos, humidade e à absorção excessiva de água estas podem vir a ter problemas como corrosão das armaduras ou desagregação do material.

#### **4.6 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO DOS CLORETOS POR ENSAIO DE MIGRAÇÃO EM REGIME NÃO ESTACIONÁRIO**

Este ensaio tem como objetivo medir a capacidade do betão de resistir à penetração dos íões cloreto. Este ensaio é extremamente importante para prever a durabilidade das estruturas de betão armado, quando

expostas a ambientes agressivos, como áreas marítimas, onde a presença de cloretos é mais elevada. Através deste ensaio é possível determinar o coeficiente de difusão, que se trata da taxa de transporte de cloretos no material, avaliar a resistência à penetração de cloretos e determinar a profundidade de penetração dos cloretos. (MARIA BEATRIZ SILVA SANTOS FERREIRA, 2017)

A migração dos cloretos em regime não estacionário ocorre quando os íões se movem através do betão sob um campo elétrico, e não por um processo de difusão pura. A aplicação de uma diferença de potencial (voltagem) acelera o movimento dos íões cloreto, permitindo que os resultados sejam obtidos mais rapidamente.

O valor de referência associado ao coeficiente de difusão dos íões cloreto em pasta de cimento, encontra-se na ordem dos  $10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ . (ÂNGELA ESTRELA LOPES AMARAL, 2012)

Este ensaio é realizado segundo a especificação LNEC, E463:2004.

### **Procedimento do ensaio**

O ensaio é realizado em provetes cilindros de betão, normalmente com espessuras de 50mm, sendo estes obtidos normalmente a partir de cilindros maiores. Estes provetes são colocados numa manga de borracha, sendo o provete colocado num compartimento onde se encontra uma solução alcalina de hidróxido de sódio (NaOH). Dentro da manga é colocada a solução de cloretos (NaCl).

É aplicada uma diferença de potencial, primeiramente de 30 V, que é aplicada entre os dois compartimentos por meio de eléctrodos, este cria um campo eléctrico, que acelera a migração dos íões cloretos.

A duração do ensaio pode variar entre horas ou dias, esse tempo é dependente da agressividade da solução com a voltagem aplicada.

Após o ensaio terminar o provete é retirado da manga e aberto a meio. A superfície cortada é pulverizada com uma solução de nitrato de prata que reage com os íões cloreto, sendo visível a penetração do mesmo. A cor que aparece depois de ocorrer a reação pode ser branca como cinza-escuro, ou mesmo castanho. São então efetuadas sete leituras.

Com base na profundidade de penetração dos cloretos e na diferença de potencial aplicada, é possível calcular o coeficiente de difusão dos cloretos em regime não estacionário (D).

Este ensaio é importante pois ajuda na previsão de vida de uma estrutura, especialmente aquelas localizadas em ambiente marinho. A presença de cloretos é um dos principais fatores que aceleram a corrosão das armaduras, resultando em falhas estruturais muito graves, este ensaio pode ser usado no controlo de qualidade para verificar se o betão produzido cumpre com os requisitos de durabilidade específicos e no desenvolvimento de betões especiais.

## 4.7 ENSAIO – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

### Introdução

O ensaio da resistência à compressão é um ensaio que tem como objetivo saber a capacidade máxima de resistência à compressão do betão, mas também a sua carga máxima de rotura.

Este ensaio é realizado segundo a norma segundo a NP 12390-3:2011.

### Procedimento do ensaio

Inicialmente são efetuadas as verificações de conformidade segundo a norma, verificações essas de perpendicularidade, planeza e dimensões.

Em seguida o provete é colocado no equipamento de ensaio (prensa) e é aplicada uma carga a velocidade constante de 0.6 MPa/s, até se atingir a rotura, ou seja, até ao ponto máximo de resistência. O resultado é a carga máxima atingida. A Figura 4.5 mostra o provete pronto a ser ensaiado.



Figura 4.6 - Ensaio de resistência à compressão

As roturas verificadas podem ser ou não satisfatórias, como exemplificado nas Figura 4.7 e Figura 4.8 respetivamente. Caso se verifique uma rotura não satisfatória, esta deve ser registada, fazendo-se referência ao tipo de rotura mais aproximado, conforme a Figura 4.8

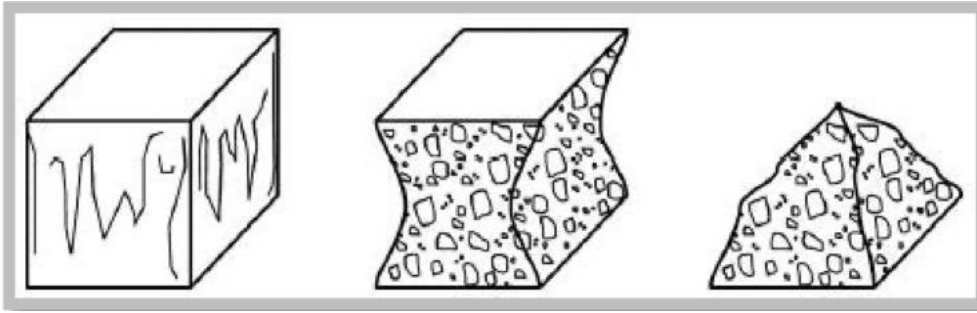


Figura 4.7 - Roturas satisfatórias de provetes cúbicos (NP 12390-3:2011)

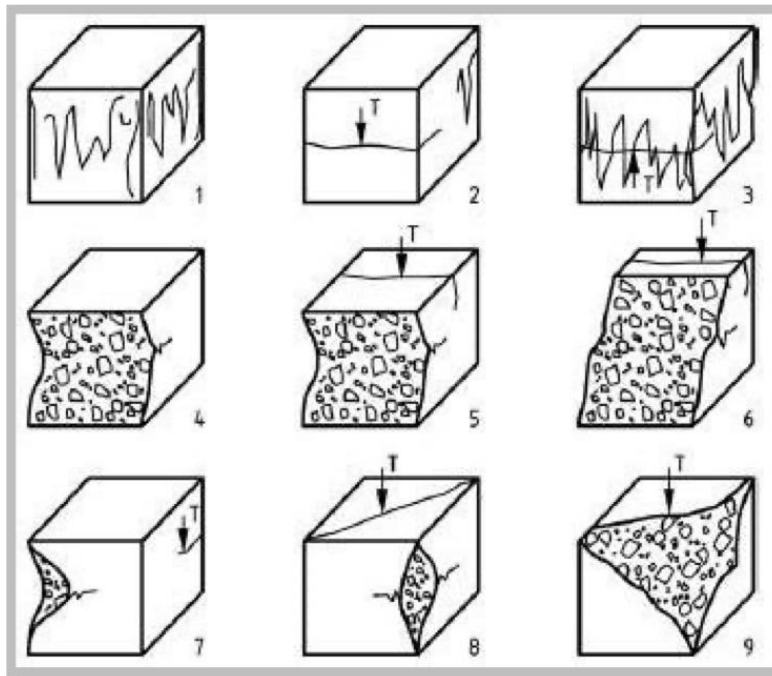


Figura 4.8 - Roturas não satisfatórias de provetes cúbicos (NP 12390-3:2011)

A resistência à compressão ( $f_c$ ) é obtida a partir da equação, em que  $F$  é a carga máxima à rotura [kN] e  $A_c$  é área da secção transversal do provete na qual é aplicada a força de compressão [mm<sup>2</sup>].

$$f_c = \frac{F}{A_c} [KN/mm^2]$$

## Capítulo 5

### CASO DE ESTUDO

Tendo em vista a análise do impacto que cada uma das variáveis apresentadas anteriormente tem na durabilidade do betão, na corrosão das armaduras, procedeu-se a uma campanha experimental que passou pela betonagem de conjuntos de onze provetes, com diferente cenário. Na realização do trabalho experimental foram betonados tipos de provetes, como mencionado, em três tipos de moldes, nomeadamente um prisma (com incorporação de varões de aço), quatro cubos e seis cilindros, como é apresentado na Figura 5.1.



a) Prisma



b) Cubos



c) Cilindros

Figura 5.1 - Provetes após moldagem

Nos prismas foram incorporados varões de aço com 16 mm de diâmetro colocados longitudinalmente ao provete. Para facilitar as leituras do potencial de corrosão foi deixada nos todos do provete prismático uma extremidade de cada varão exposta.

## 5.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Foram efetuados os cálculos para se obter as quantidades que seriam necessárias para cada tipo de material para a realização dos provetes necessários para a realização do estudo. Os materiais e as quantidades necessárias estão descritas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Materiais e quantidades

Materiais	Quantidades
Brita 4/10	43.3Kg
Areia 0/4	33.5Kg
Areia 0/2	13.56kg
Cimento	18kg
Água	7Litros
MasterEase 5025	72g
Posolite 7002	108g
Cloretos de sódio	180g

O cimento usado no fabrico dos provetes é o cimento Portland de calcário da SECIL, do tipo CEM II/B-L 32,5N. Trata-se de um cimento que está certificado através da NP EN 197-1.

Apresenta um menor calor de hidratação e uma melhor trabalhabilidade que um cimento CEM I da mesma classe de resistência. Tem menor resistência inicial, pois o seu desenvolvimento é mais lento. A Figura 5.2 resume as características químicas, mecânicas e físicas do cimento e ainda os valores médios da resistência à compressão.



Figura 5.2 -Características do cimento SECIL (SECIL, maio 2018)

Foram utilizados dois adjuvantes, o Posolite 7002 e o MarterEase 5025. O adjuvante MarterEase 5025 é um aditivo que tem como finalidade ajudar para que o betão fique mais plastificante/redutor de água de elevada atividade.

O adjuvante Posolite 7002 permite melhorar a qualidade e a resistência do betão, o seu acabamento superficial, enquanto oferece uma prolongada manutenção de consistência.

## 5.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização deste trabalho, como já mencionado anteriormente, foram efetuados prismas, cubos e cilindros, cada um para a realização de ensaios específicos. Cada prisma tem dimensões de 150x150x600 mm, os cubos apresentam dimensões de 150x150x150 mm, com exceção dos cilindros que não apresentam uma medida específica.

Foram idealizados três tipos de cenário para ajudar a entender como a corrosão das armaduras é afetada nos mesmos.

Para que a penetração dos cloretos fosse somente pela face do prisma foi aplicada parafina líquida na zona de ligação da armadura exposta ao topo do provete.

Este trabalho foca-se principalmente no ensaio do potencial de corrosão, mas os outros ensaios foram muito importantes, devido ao facto de complementarem o trabalho com informações relevantes sobre o betão e como este reage com certos materiais.

Em todos os cenários a temperatura foi sempre controlada e mantida nos  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

### 5.2.1 Desenvolvimento de cada cenário

De modo que fosse possível termos alguns tipos de interpretação, foram realizados três tipos de cenário. Nos três cenários os principais materiais foram iguais, com exceção de que no cenário 3 foi acrescentado à mistura da argamassa sal.

Para além da mistura da argamassa outra diferença entre cenários foi o tipo de cura que cada provete, de cada cenário, esteve sujeita. O tipo de cura que existiu foi a cura em água normal e com água do mar.

Para todos os provetes realizados a razão A/C é de 0.39.

#### Cenário 1

N cenário 1, as amostras serão apresentadas com a identificação de Amostra 1. Para as amostras deste cenário, foi idealizado que o betão teria os materiais necessários para a realização do mesmo e que a cura dos mesmos seria em água normal. Os constituintes do betão já foram mencionados anteriormente.

Cada tipo de provete (mencionados anteriormente) serão usados para um ensaio específico, os provetes cúbicos serão para o ensaio de resistência à compressão, o provete prismático será para o ensaio de potencial de corrosão, enquanto os provetes cilíndricos serão utilizados no ensaio de determinação do teor de cloretos, difusão de cloretos, absorção de água por capilaridade e absorção de água por imersão. Para uma melhor interpretação do cenário 1 é apresentada esquematicamente na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Cenário 1

Descrição	Composição do betão (Tabela 5.1 com exceção do cloreto de sódio)  Cura em água normal.
Provetes	1 prisma com 4 varões (diâmetro de 16 mm), no qual 2 varões apresentavam um recobrimento de 15 mm e os outros 2 varões apresentavam um recobrimento de 30 mm;  4 cubos;  6 cilindros.

## Cenário 2

O cenário 2 apresenta exatamente a mesma composição que o cenário 1 com a exceção da cura dos provetes, que já esta é realizada com água do mar. A identificação dos provetes do cenário 2 é Amostra 2.

Para este cenário foram realizados diferentes tipos de provetes, tais como 3 provetes cilíndricos (sem medidas exatas), 4 cubos (de 150x150x150 mm) e 1 primas (de 150x150x600 mm). Cada tipo de provete será usado para um ensaio específico, os provetes cúbicos serão para o ensaio de resistência à compressão, o provete prismático será para o ensaio de potencial de corrosão, enquanto os provetes cilíndricos serão utilizados no ensaio de determinação do teor de cloretos e difusão de cloretos. Para uma melhor interpretação do cenário 2 é apresentada esquematicamente na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Cenário 2

Descrição	Composição do betão (Tabela 5.1, com exceção do cloreto de sódio); Cura em água do mar.
Provetes	1 prima com 4 varões (diâmetro 16 mm), no qual 2 varões apresentavam recobrimento de 15 mm e os outros 2 varões apresentavam um recobrimento de 30 mm; 4 cubos; 6 cilindros.

## Cenário 3

O cenário 3 para além da composição que existe no cenário 1 e 2, tem na sua amassadura cloretos de sódio e a sua cura, como no cenário 2, foi realizada em água do mar. Os provetes no cenário 3 são identificados com Amostra 3.

Para este cenário foram realizados diferentes tipos de provetes, tais como 3 provetes cilíndricos (sem medidas exatas), 4 cubos (de 150x150x150 mm) e 1 primas (de 150x150x600 mm). Cada tipo de provete será usado para um ensaio específico, os provetes cúbicos serão para o ensaio de resistência à compressão, o provete prismático será para o ensaio de potencial de corrosão, enquanto os provetes

cilíndricos serão utilizados no ensaio de determinação do teor de cloretos. Para uma melhor interpretação do cenário 3 é apresentada esquematicamente na Tabela 5.4

Tabela 5.4 - Cenário 3

Cenário	Composição do betão (Tabela 5.1); Cura em água do mar.
Provetes	1 prima com 4 varões (diâmetro de 16 mm), no qual 2 varões apresentavam recobrimento de 15 mm e os outros 2 varões apresentavam um recobrimento de 30 mm;  4 cubos;  6 cilindros.

## Capítulo 6

### ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo serão expostos os resultados obtidos e estes serão divididos por ensaio realização.

Primeiramente serão colocados os resultados dos ensaios que caracterizam o betão, em seguida o ensaio do teor de cloretos e por fim o ensaio de potencial de corrosão.

#### 6.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO BETÃO

##### 6.1.1 Ensaio de absorção de água por capilaridade e imersão

Como já explicado no capítulo 4.4 e 4.5 os ensaios de absorção de água por capilaridade e imersão foram realizados segundo a regulamentação adequada e tiveram como principal objetivo perceber como é que o betão que foi realizado em laboratório se comporta quando exposto a certas quantidades de água (parcialmente em água e totalmente imerso). No que diz respeito à quantidade de água que é capaz de absorver.

A Tabela 6.1, que é o boletim de ensaio que respeita a regulamentação, resume os resultados obtidos para o ensaio de absorção por capilaridade. Da análise desta tabela, é possível retirar que o valor do coeficiente de absorção é de 0.08 (mg/(mm<sup>2</sup>.min<sup>0.5</sup>)). Comparando este valor com a [Figura 3.9](#) e observando a [Figura 6.1 - Gráfico](#) obtido através dos resultados da Tabela 6.1 é possível verificar que a qualidade do betão se encontra entre elevada e média. Assim sendo, o betão apresenta uma baixa/média capacidade de absorver água, o que quer dizer que o material apresenta boas propriedades a nível de resistência à capilaridade.

O valor do coeficiente de absorção foi retirado a partir do gráfico da [Figura 6.1](#), através do declive da reta.

Tabela 6.1 - Resultados obtidos no ensaio por capilaridade

		Amostra 1	
Diâmetro médio (mm)		83,8	
Espessura média (mm)		167,0	
Área superfície (mm <sup>2</sup> )		5515,4	
		Massa	i (mg/mm <sup>2</sup> )
		(g)	
Tempo	0	2079,5	0,00
	15 min	2082,6	0,6
	30 min	2083,7	0,8
	1 h	2085,4	1,1
	2 h	2087,8	1,5
	4 h	2088,9	1,7
	24 h	2098,7	3,5
Coeficiente de absorção (mg/(mm <sup>2</sup> .min <sup>0.5</sup> ))		0,08	
Altura máxima de água - 24h (mm)		-	

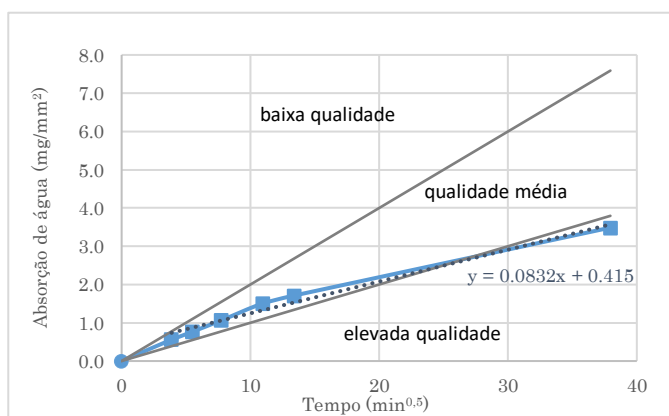


Figura 6.1 - Gráfico obtido através dos resultados da Tabela 6.1

Para complementar o ensaio realizado por capilaridade foi também realizado o ensaio de absorção de água por imersão.

Neste caso o provete esteve totalmente submerso em água, e os valores são apresentados na Tabela 6.2. Em Portugal os valores de referência dependem do tipo de estrutura, esta informação é apresentada na especificação do LNEC, que se vai aplicar o betão. Quando se trata de estruturas como pontes ou barragens o valor de absorção deve ser inferior a 5%, mas para pavimentos ou estruturas com menor exigência esse valor já é de 10% (MARIA BEATRIZ SILVA SANTOS FERREIRA, 2017). Apesar de existirem estes dois valores, o valor obtido é mesmo assim superior ao recomendado. Analisando o resultado da percentagem de absorção de água por imersão é possível observar que o valor é igual a 12.9% que se situa acima do valor estabelecido para estruturas de menor exigência.

Tabela 6.2 - Resultados obtidos através do ensaio de absorção por imersão

	Provete 1
Diâmetro (mm)	83,8
Altura (mm)	167,0
Volume (m <sup>3</sup> )	0,001
massa do provete seco - m <sub>1</sub> (g)	2025,5
massa do provete imerso - m <sub>2</sub> (g)	1223,5
massa do provete saturado - m <sub>3</sub> (g)	2144,0
Absorção de água por imersão - A <sub>vc</sub> (%)	12,9

### 6.1.2 Ensaio de difusão de cloretos

O ensaio de difusão de cloretos foi realizado na amostra 1. Como mencionado no capítulo 5.2.1 a amostra 1 teve uma cura realizada em água normal.

Como mencionado no capítulo 4.6 o principal objetivo é a determinação da taxa de transporte de cloretos no material, avaliar a resistência à penetração de cloretos e determinar a profundidade de penetração dos cloretos.

Para melhor interpretação do resultado obtido na Tabela 6.3, através da Especificação LNEC E364-2007 e especificação LNEC E465-2007, foi selecionado um valor de comparação. Para se poder escolher este valor é necessário primeiramente escolher, através da especificação LNEC E364 o melhor limite a nível de composição e da classe de resistência do betão sob ação dos cloretos. Como se trata de um betão, que na

sua constituição apresenta um cimento CEM II/B-L, o que mais se adequa é um XS1/XD1 para uma vida útil de 50 anos.(LNEC, 2007)

Em seguida, recorreu-se à especificação LNEC E465, tendo-se selecionado o coeficiente de difusão segundo as características mencionadas anteriormente. O valor escolhido foi para uma estrutura perto do mar, com uma relação A/C de 0.4, um recobrimento de 3.0 cm, esse valor corresponde a um máximo de  $8.3 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ .

Assim sendo, avaliando o valor de coeficiente de difusão da Tabela 6.3\_é possível concluir que os valores obtidos para a amostra 1 estão dentro dos valores aceitáveis para a classe definida, apesar de não ser o ideal para locais com agentes muito agressivos.

Tabela 6.3 - Resultados obtidos através do ensaio de difusão de cloretos (Amostra 1)

		1	2
Diâmetro médio (mm)		84,28	84,45
Espessura média (mm) - L		50,9	51,44
Temperatura média da solução anódica (°C) -T		22	22
Leitura das profundidades de penetração dos cloretos (mm) - Xd	1	11	14
	2	14	17
	3	15	16
	4	11	18
	5	15	16
	6	12	19
	7	16	17
Profundidade média de penetração (mm) - Xd,média		13,4	16,7
Tempo de duração do ensaio (h) - t		24	24
Voltagem aplicada (V) - U		25	30
Intensidade de corrente inicial (mA)		54	58
Intensidade de corrente final (mA)		54	64
Coeficiente de difusão ( $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ) - D		7,34	7,84

### 6.1.3 Ensaio de Carbonatação

O ensaio de carbonatação foi realizado como um ensaio suplementar, tendo como objetivo compreender se, para além da penetração de cloretos, também ocorrer a carbonatação.

As Figura 6.2, Figura 6.3, Figura 6.4 mostram a cor-de-rosa, que é a reação visível do nitrato de prata aplicado no betão. Como esta cor está estendida a todo o provete é possível afirmar que não estava a ocorrer carbonatação em nenhuma das amostras.



Figura 6.2 - Ensaio de carbonatação na amostra 1



Figura 6.3 - Ensaio de carbonatação amostra 2



Figura 6.4 - Ensaio de carbonatação amostra 3

#### 6.1.4 Ensaio resistividade elétrica

Os ensaios de resistividade elétrica do betão foram realizados para os três cenários, nos provetes prismáticos, Este ensaio foi realizado na superfície do betão aos 984 dias.

O ensaio de resistividade elétrica foi realizado em cada face do provete, recobrimento de 1.5cm e 3.0cm, com os valores a serem retirados sem ser em cima da zona onde se encontra a armadura.

Como referido no capítulo 4.2, quando a resistividade elétrica do betão é baixa a probabilidade de corrosão das armaduras aumenta, e vice-versa.

A Tabela 6.4 apresenta os resultados obtidos em cada amostra. É possível verificar que a amostra 1, a amostra que não contém sal na amassadura e cuja cura foi realizada em água normal, apresentou os valores de resistividade mais elevados em comparação com as duas outras amostras. Ainda assim, em comparação aos valores de referência, todas apresentam valores abaixo de 8 k $\Omega$ cm, o que indica que existe, em todas as amostras probabilidade de ocorrer corrosão nas armaduras.

Se analisarmos a nível de cura do betão o resultado obtido faz algum sentido, isto porque a quantidade de cloretos presente na água normal é muito menor do que a quantidade de cloretos presentes na água do mar, daí os valores de resistividade serem bastante diferentes entre a amostra 1 e as amostras 2 e 3.

Tabela 6.4 - Ensaio da resistividade elétrica - Resultados

Resistividade do betão			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Face recobrimento 1.5	7.4 kΩcm	3.6 kΩcm	4.5 kΩcm
Face recobrimento 3.0	7.4 kΩcm	3.6 kΩcm	4.5 kΩcm

Analisando os valores das amostras 2 e 3, apesar dessa diferença, ambas as amostras apresentaram valores baixos de resistividade para o betão, o que indica, como mencionado anterior, que a existe uma elevada probabilidade de corrosão das armaduras nestas amostras.

### 6.1.5 Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão é um ensaio que nos indica qual a capacidade de resistência que uma dada amostra possui, à data da realização do ensaio. A resistência do betão vai aumentando até atingir a idade de 28 dias (idade convencionada para a classificação do betão que já ocorreu a hidratação do cimento)). Em betões de composição normal, depois desta idade a sua resistência não aumenta muito.

As Tabela 6.5, Tabela 6.6, Tabela 6.7 apresentam os resultados obtidos em cada amostra aos 7, 28 (idade mais importante a nível de resistência), 395 e 504 dias. Analisando o resultado obtido aos 28 dias, é possível indicar que se trata de um betão C25/30. Para complementar as tabelas foram realizados gráficos para se poder interpretar melhor os resultados obtidos (Figura 6.5, Figura 6.6 e Figura 6.7).

Comparando os resultados obtidos nas três amostras aos 28 dias a diferença entre a amostra 2 e a 1 é de 2.5MPa, enquanto da amostra 3 e 1 a diferença já é de 4.2MPa, estes resultados provam que a água do mar tem efeitos preocupantes no betão.

Estes valores podem ser explicados da seguinte forma, os sais presentes na água do mar podem interferir no processo de hidratação do cimento, resultando em menor formação de produtos de hidratação, estes são os verdadeiros responsáveis pela resistência.

É possível concluir que com estas diferenças de valores de resistência entre as amostras, a cura em água do mar tem um impacto prejudicial e significativo no desenvolvimento da resistência.

Tabela 6.5 - Resultados da amostra 1 - Ensaio à compressão

Provetes	Idade (dias)	Massa do provete (kg)	Carga de rotura KN	Resistência à compressão (MPa)
1.1	7	7.980	562,4	25.0
1.2	28	7.966	664,9	29,6
1.3	395	8.017	785.4	34.9
1.4	504	8.067	840.7	37.4

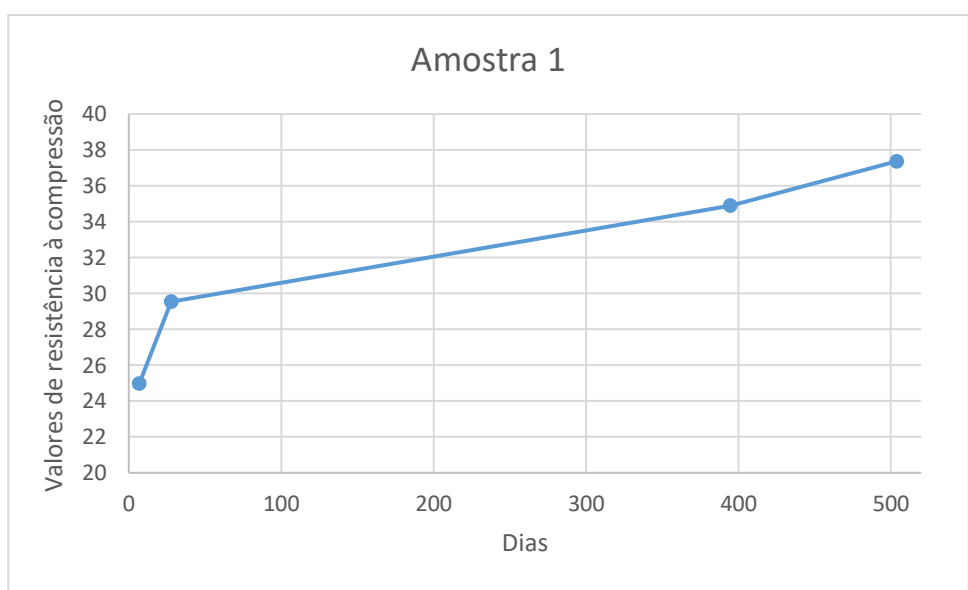


Figura 6.5 - Resultados obtidos no ensaio de resistência compressão (Amostra 1)

Tabela 6.6 - Resultados da amostra 2 - Ensaio à compressão

Provetes	Idade (dias)	Massa do provete (kg)	Carga de rotura KN	Resistência à compressão (MPa)
2.1	7	8,008	516,0	22,9
2.2	28	8,073	619,7	27,5
2.3	395	8.039	699.9	31.1
2.4	504	8.093	735.0	32.7

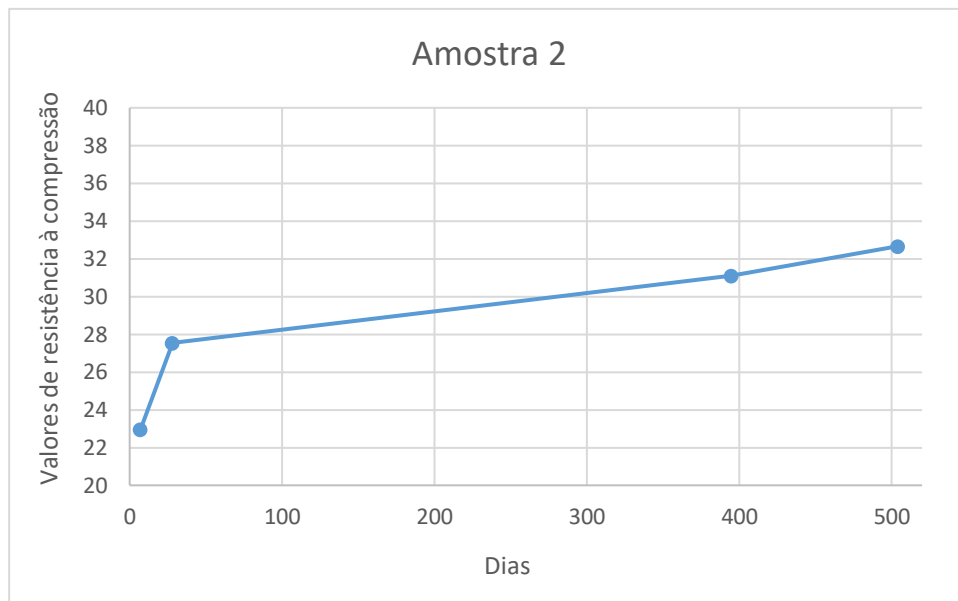


Figura 6.6 - Resultados obtidos no ensaio de resistência compressão (Amostra 2)

Tabela 6.7 - Resultados da amostra 3 - Ensaio à compressão

Provetes	Idade (dias)	Massa do provete (kg)	Carga de rotura KN	Resistência à compressão (MPa)
2.1	7	8,092	475,5	21,1
2.2	28	8,162	581,4	25,8
2.3	395	8.076	706.7	31.4
2.4	504	8.152	703.4	31.3

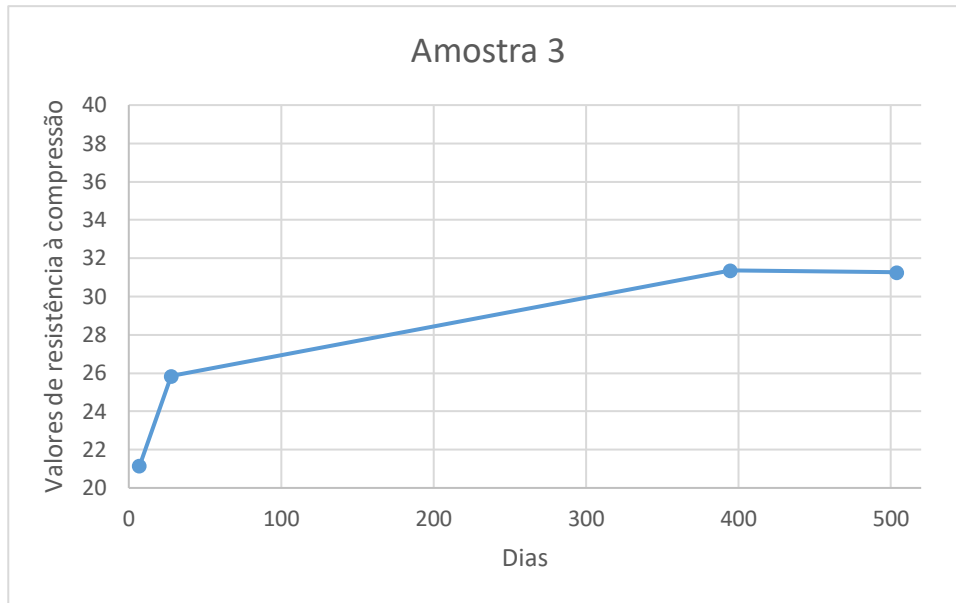


Figura 6.7 - Resultados obtidos no ensaio de resistência compressão (Amostra 3)

### 6.1.6 Ensaio de teor de cloretos

O ensaio de teor de cloretos foi realizado com o objetivo de se avaliar a penetração de cloretos ao longo do tempo, a diferentes profundidades, desde a superfície exposta. A partir deste ensaio é possível estimar a percentagem de cloretos solúveis na massa de cimento.

Para a realização deste ensaio, foram moldados provetes cilíndricos dentro de porções de tubo plástico. Durante o tempo de cura, foi colmatado com parafina o espaço entre o molde e a superfície lateral do provete do betão. Foi realizado este procedimento para que a penetração de cloretos se desse exclusivamente pela superfície do betão.

Analisando a Figura 4.5, que se encontra presente no capítulo 4, é possível verificar que para o tipo de betão utilizado neste trabalho se define como teor máximo de cloretos em massa de cimento o valor de 0.2%, não sendo permitidos valores acima deste.

Na Figura 6.8\_(amostra 1 onde a cura foi realizada em água normal), é possível verificar que o teor de cloretos ao longo do tempo não aumenta significativamente. Os valores máximos de teor de cloretos em massa de cimento são de 0.1% ao fim de 1091 dias (Tabela 6.8), sendo inferior ao máximo estipulado na Figura 4.5.

É possível verificar que na amostra 1 não apresenta risco elevado de existir penetração de cloretos em níveis significativos para promover a corrosão das armaduras.

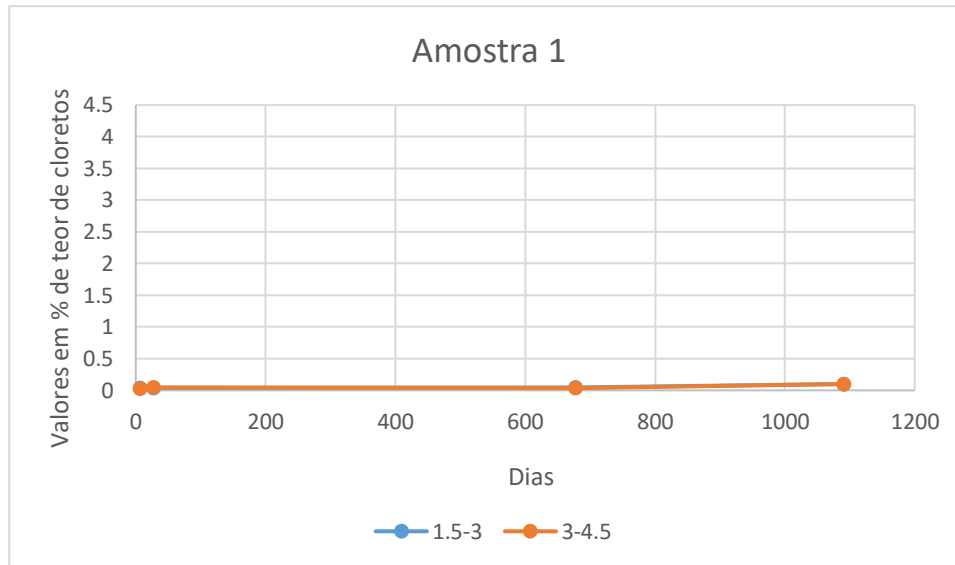


Figura 6.8 - Resultados obtidos pelo ensaio de teor de cloretos (Amostra 1)

Tabela 6.8 - Resultados do ensaio de penetração de cloretos (valores em %) (Amostra1)

	1.5-3.0 cm	3.0-4.5 cm
7 dias	0,04%	0,03%
28 dias	0,04%	0,05%
678 dias	0,05%	0,04%
1091 dias	0,1%	0,1%

Na amostra 2, Figura 6.9, é possível ver um aumento progressivo no teor de cloretos ao longo dos dias. A série da profundidade de 1.5-3.0 apresenta teores mais elevados de cloretos em comparação à série 3.0-4.5 durante todo o período.

Analisando a Figura 6.9 e a Tabela 6.9 verifica-se que ao fim de 1091 dias, à profundidade de 1.5-3.0 cm obtém-se um valor máximo de teor de cloretos em massa de cimento de 2.55% enquanto que a profundidade superior, de 3.0-4.5 cm, o valor máximo obtido é de 1,69%. De forma lógica, o teor em cloretos diminui com a profundidade, obtendo-se em ambos os casos ao fim de 1091 dias valores superiores a 0.2%.

Os valores iniciais de teor de cloretos até aos 28 dias ainda se encontram no limite, mas com o passar do tempo o aumento é muito acentuado.

É possível concluir que a exposição à água do mar, onde existem uma maior concentração de cloretos, aumentou significativamente o teor de cloretos no betão, ao longo do tempo.

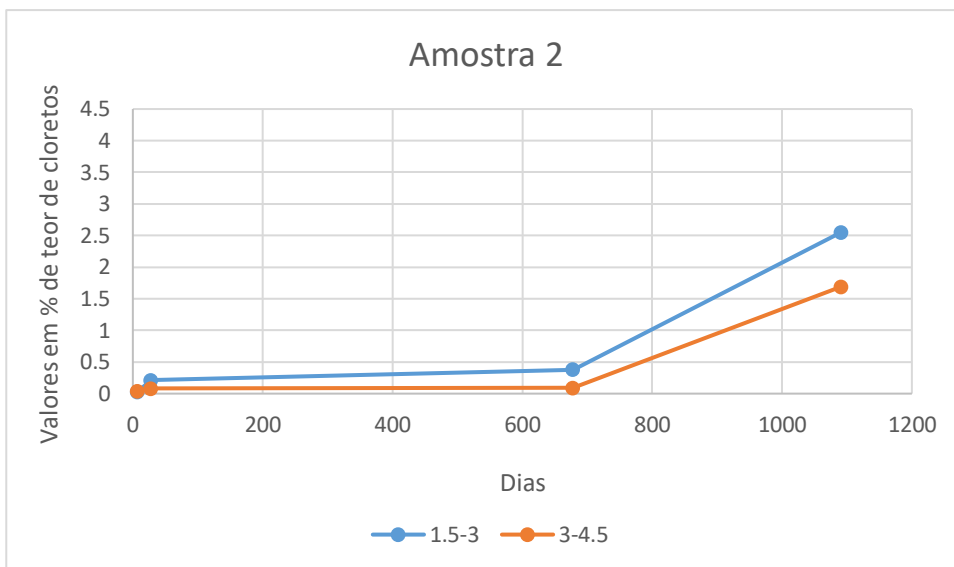


Figura 6.9 - Resultados obtidos pelo ensaio de teor de cloretos (Amostra 2)

Tabela 6.9 – Resultados obtidos pelo ensaio de teor de cloretos (valores em %) (Amostra 2)

	1.5-3.0 cm	3.0-4.5 cm
7 dias	0,03%	0,045
28 dias	0,21%	0,08%
678 dias	0,38%	0,09%
1091 dias	2,55%	1,69%

Na Figura 6.10 é possível ver um aumento progressivo no teor de cloretos ao longo dos dias para os provetes da amostra 3. Observando a Figura 6.10, tanto a 1.5-3.0 cm de profundidade quanto a 3.0-4.5 cm, verifica-se um aumento acentuado no teor de cloretos ao longo do tempo, com um crescimento expressivo a partir dos 600 dias. A 1.5-3.0 cm de profundidade verifica-se, aos 1091 dias, um valor de 4%, enquanto a 3.0-4.5 cm o valor obtido é de 3.3%. Estes valores são apresentados na Tabela 6.10.

É possível verificar que aos 7 dias já existe cloretos na massa de cimento uma vez que estes forma adicionados na amassadura. Os valores obtidos são elevados em comparação com o valor máximo admissível. Sendo o valor máximo de 0,2% e o valor aos 7 dias de 1,04% e 0,7% às duas profundidades de ensaio.

Analisando a Figura 6.10 é possível concluir que a cura em água do mar e a amassadura com sal resultam em uma contaminação extremamente alta por cloretos, muito superiores aos ensaios anteriores (Amostra 1 e amostra 2). A presença de sal no processo de amassadura, combinado com a cura em água do mar, cria um ambiente de alta concentração de cloretos desde os primeiros dias.

As duas profundidades apresentam comportamentos semelhantes nos primeiros 600 dias, com um aumento gradual, mas a partir desse ponto, ambas começam a subir mais rapidamente, apesar da profundidade 1.5-3.0 cm manter valores de teor de cloretos sempre ligeiramente superiores face aos obtidos a profundidade 3.0-4.5 cm.

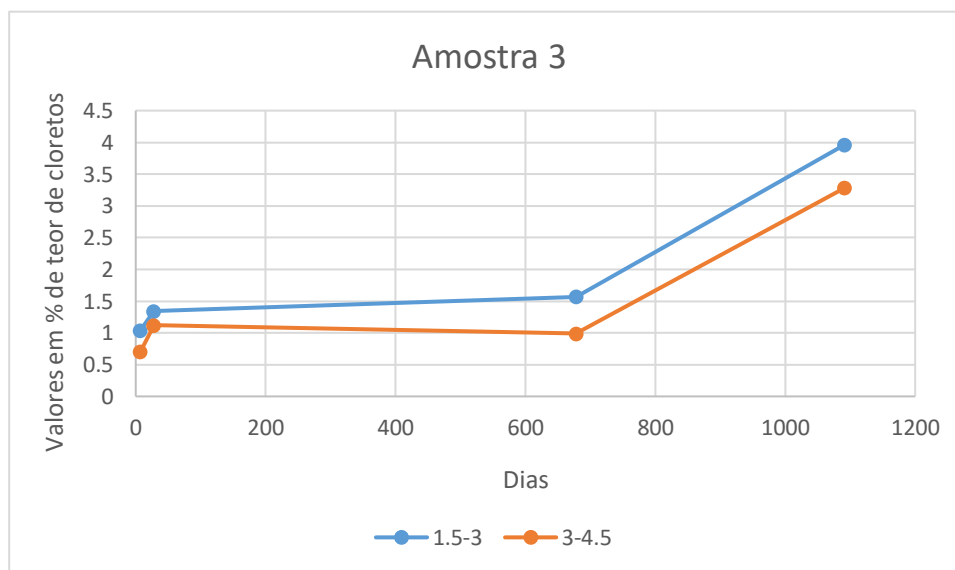


Figura 6.10 - Resultados obtidos pelo ensaio de teor de cloretos (Amostra 3)

Tabela 6.10 - Resultados obtidos ensaio de teor de cloretos (valores em %) (Amostra 3)

	1.5-3.0 cm	3.0-4.5 cm
7 dias	1,04%	0,7%

28 dias	1,34%	1,12%
678 dias	1,57%	0,99%
1091 dias	3,96%	3,28%

### 6.1.7 Potencial de corrosão

Neste subcapítulo serão apresentadas imagens e gráficos referentes ao ensaio de potencial de corrosão. As imagens são importantes porque ajudam na interpretação das o dos gráficos.

A análise dos gráficos permite uma melhor compreensão da corrosão nas amostras e da influência do meio de cura no comportamento das armaduras nas zonas protegidas.

Os provetes foram abertos de forma a ser possível avaliar o nível de corrosão das armaduras após o período de condicionamento. O objetivo, para além de avaliar o estado de corrosão dos varões, era de voltar a efetuar o ensaio para validação dos resultados obtidos. Os resultados assim obtidos, designados por leitura final, serviram para delimitar as leituras máximos possíveis para cada cenário. A leitura final foi realizada para os diferentes recobrimentos de armadura, tendo-se obtido valores muito semelhantes nos dois casos.

Para obter estes últimos valores o ensaio foi realizado colocando a pinça na armadura, que se encontrava protegida pelo betão, enquanto durante o processo de condicionamento a medição era realizada colocando a pinça na parte exposta da armadura.

Com o tempo prolongado de exposição a porção de varão deixada fora do provete começou a apresentar sinais de corrosão muito evidente. Apesar de se ter efetuado a proteção da ligação do varão à superfície de betão dos provetes com parafina e de se ir efetuando uma limpeza da superfície dos varões antes da realização das leituras, surgiu a desconfiança da possibilidade de haver nesta zona uma propagação da corrosão não desejável, uma vez que se pretende neste trabalho avaliar a propagação da corrosão por exposição da superfície do provete de betão.

Ao analisar os resultados foi possível concluir que os provetes quando se encontravam bastante húmidos apresentavam valores de potencial de corrosão mais negativos. Com esta conclusão os provetes eram retirados da cura e ficavam 3 dias a secar, todos no mesmo local e à mesma temperatura.

- **Amostra 1**

As Figura 6.11, Figura 6.12 e Figura 6.13 correspondem aos varões retirados do provete da amostra 1, amostra em cura em água normal.



Figura 6.11 - Varões de aço retirados do prisma da amostra 1, no qual a sua cura foi realizada em água normal



Na zona protegida pelo betão, não existiu corrosão da armadura.

Figura 6.12 -Amostra 1: Recobrimento 1.5 cm



Na zona protegida pelo betão, não se verifica corrosão das armaduras.

Figura 6.13 - Amostra 1: Recobrimento 3.0

Analisando a Figura 6.14 é possível verificar que os valores de potencial de corrosão no caso de recobrimento de 3.0 cm se encontram muito próximos da leitura final, estando próximo do limite de não estar a ocorrer corrosão das armaduras, conforme evidente pela análise da Figura 6.13.

Para recobrimento de 1.5 cm verificam-se valores de e potencial de corrosão que variam ao longo do tempo de ensaio, tendo atingido o valor máximo do limite de atividade corrosiva incerta. Contudo, pela análise dos varões no final dos ensaios, após abertura dos provetes, é possível verificar que não existe corrosão nas armaduras. Os valores de potencial de corrosão obtidos, mais negativos do que o expectável, podem ter sido influenciados pela humidade interna do provete aquando das leituras.

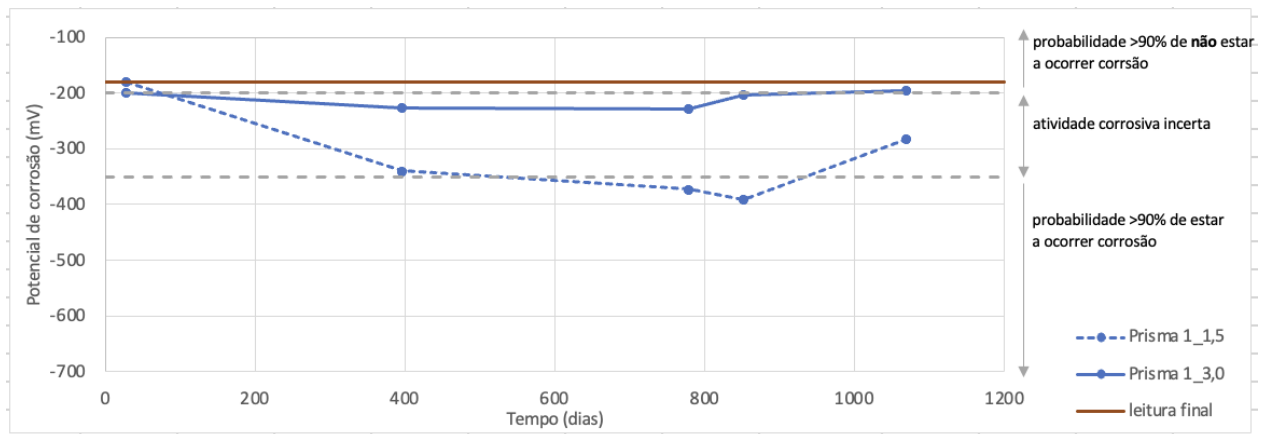


Figura 6.14 - Resultados obtidos no ensaio de potencial de corrosão (Amostra1)

▪ **Amostra 2**

As Figura 6.15, Figura 6.16, Figura 6.17, Figura 6.18 e Figura 6.19 correspondem aos varões retirados dos provetes da amostra 2, amostra em cura em água do mar.



Figura 6.15 - Varões de aço retirados dos provetes da amostra 2, no qual a sua cura foi realizada em água do mar



Figura 6.16 - Amostra 2: Recobrimento 1.5 cm



Na zona protegida pelo betão existem várias zonas com corrosão de armadura

Para além das manchas de corrosão existiam umas manchas esverdeadas.

Verificou-se ligeiro fenómeno de corrosão da armadura junto ao topo do provete – corrosão não desejável, não acontece pela superfície do betão.

Figura 6.17 - Amostra 2 - Zonas de maior contaminação (Recobrimento 1.5)



Figura 6.18 - Amostra 2: Recobrimento 3.0 cm



Na zona protegida pelo betão existem pequenos pontos de corrosão

Verificou-se fenómeno intenso de corrosão da armadura junto ao topo do provete – corrosão não desejável, não acontece pela superfície do betão

Figura 6.19 - Amostra 2 - Zonas de maior contaminação (Recobrimento 3.0 cm)

Analisando a Figura 6.20 é possível verificar que os valores do potencial de corrosão são bastante negativos. Estes valores são da ordem de -500 mV ao fim de 1091 dias, o que significa que existe uma probabilidade superior a 90% de estar a ocorrer corrosão nas armaduras.

Se analisarmos os resultados por recobrimento, com recobrimento de 1.5 cm verificam-se valores mais próximos dos valores da leitura final. Com o recobrimento de 3.0 cm verificam-se valores um pouco

diferentes dos valores da leitura final, principalmente a partir dos 778 dias. A penetração que ocorreu pelos topos (onde a armadura se encontrava exposta) e não pela superfície do betão, justifica a obtenção de valores superiores ao esperado.

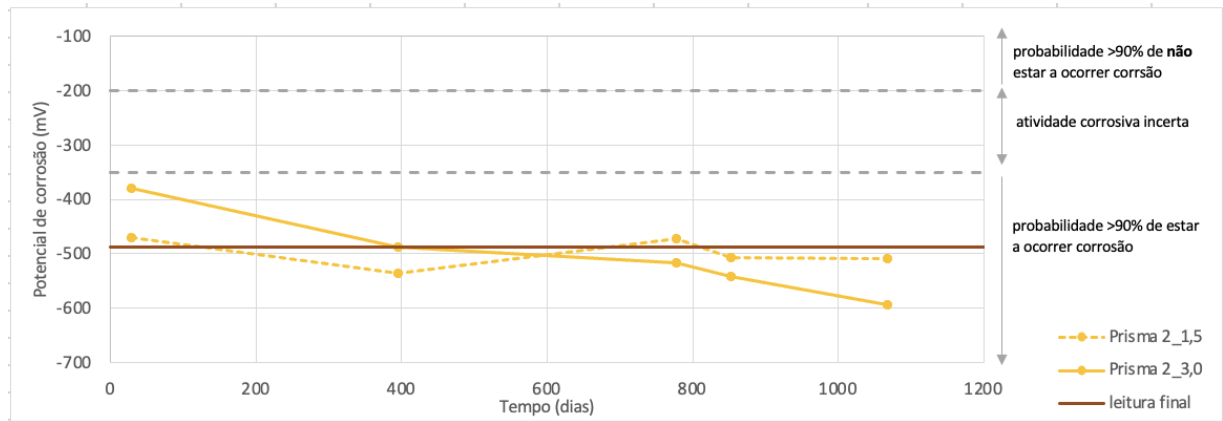


Figura 6.20 - Resultados obtidos no ensaio de potencial de corrosão (Amostra2)

### ▪ Amostra 3

As Figura 6.21, Figura 6.22, Figura 6.23, Figura 6.24 e Figura 6.25 correspondem aos varões retirados do provete da amostra 3, amostra em cura em água do mar com cloretos na amassadura.



Figura 6.21 - Varões de aço retirados dos provetes da amostra 3, no qual a sua cura foi realizada em água do mar



Figura 6.22 -Amostra 3: Recobrimento 1.5 cm



Na zona protegida pelo betão existem várias zonas com corrosão de armadura  
Verificou-se ligeiro fenómeno de corrosão da armadura junto ao topo do provete – corrosão não  
desejável, não acontece pela superfície do betão  
Na zona do betão foi encontrado manchas esverdeada.

Figura 6.23 – Amostra 3 - Zonas de maior contaminação (Recobrimento 1.5 cm)



Figura 6.24 - Amostra 3: Recobrimento de 3.0 cm



Na zona protegida pelo betão existem zonas de corrosão muito extensas

Verificou-se fenómeno intenso de corrosão da armadura junto ao topo do provete – corrosão não desejável, não acontece pela superfície do betão

Na imagem do lado esquerdo é bastante visível como a armadura se encontra corroída devido a esse motivo. Já a imagem do lado direito encontra-se bastante corroída, mas a sua corrosão não se deu pela entrada de cloretos pelo topo, mas sim pela superfície.

Era visível em zonas do betão manchas esverdeadas.

Figura 6.25 - Amostra 3 – Zonas com maior contaminação (Recobrimento 3.0 cm)

A Figura 6.26 apresenta os resultados obtidos através do ensaio de potencial de corrosão para a amostra 3, cura em água do mar e cloretos de sódio na amassadura. Os valores encontram-se na ordem dos -500 mV ao fim de 1091 dias, indicando que existe uma probabilidade superior a 90% de estar a ocorrer corrosão das armaduras.

Analisando o recobrimento de 1.5 cm, é possível verificar que os valores se aproximaram sempre dos valores da leitura final. Pelo contrário, com recobrimento de 3.5 cm, a partir de 778 dias, os valores obtidos afastam-se dos valores da leitura final. Também nesta situação esta evolução superior ao expectável pode ser justificada pela corrosão não desejável, que aconteceu pelos topos do provete.

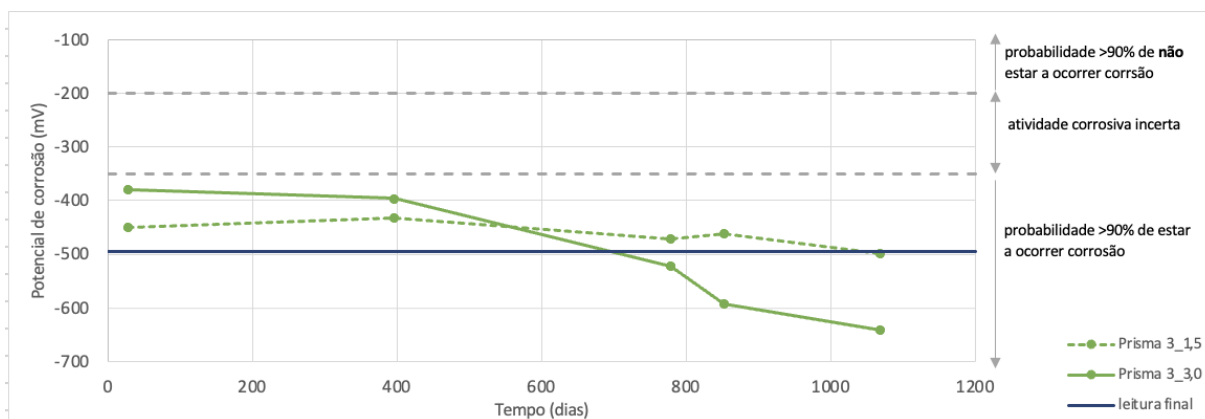


Figura 6.26 - Resultados obtidos pelo ensaio de potencial de corrosão (Amostra 3)

## Capítulo 7

### CONCLUSÕES

#### 7.1 CONCLUSÕES GERAIS

O objetivo deste trabalho consistiu na avaliação da evolução da corrosão das armaduras em estruturas de betão armado. Para esta análise moldaram-se provetes que foram submetidos a diferentes condições: cura em água normal, cura em água do mar e cura em água do mar de provetes que incluíam cloreto de sódio na amassadura. Nos provetes moldados (prismas) foram realizados dois tipos de recobrimento: recobrimento de 1.5 e recobrimento de 3.0.

Para a realização deste trabalho foi produzido em laboratório um betão regular com relação água/ligante de 0.39, cujas características de capilaridade e absorção de água foram devidamente estimadas. Verificaram-se valores de absorção de água por capilaridade para este betão que, de acordo com a bibliografia, se enquadram com os valores previstos para betão de qualidade média a elevada. Em termos de absorção de água por imersão, verificaram-se valores muito superiores aos previstos para pontes e barragens e um pouco superiores aos valores estipulados em Portugal, para estruturas de pavimentos ou estruturas de menor exigência.

Para além dos ensaios de absorção de água por capilaridade e por imersão, foi realizado o ensaio de difusão de cloretos, verificando-se valores baixos para este tipo de betão, indicando que o betão apresenta uma resistência elevada à penetração por difusão de agentes agressivos. Segundo a especificação LNEC, o valor corresponde a este tipo de betão é no máximo de 8.3.

Para se poder avaliar a nível da resistência mecânica das amostras de cada cenário, foi realizado o ensaio de resistência à compressão. Os valores foram superiores na amostra 1 em relação as amostras 2 e 3, indicando que a cura em água do mar pode ter afetado esses valores, devido à elevada presença de cloretos na água do mar.

A avaliação da resistividade elétrica do betão, foi um ensaio complementar, realizado a fim de compreender a relação entre a resistividade do betão e a resistência à corrosão das armaduras. As amostras 2 e 3, que a cura foi realizada em água do mar, apresentaram uma resistividade mais baixa do que a amostra 1. Resistividades mais baixas apresentam maior probabilidade de poder ocorrer corrosão

nas armaduras. Os valores obtidos nas 3 amostras foram ainda assim sempre inferiores a 8 kΩcm, o que permite concluir que há probabilidade de ocorrer corrosão das armaduras no interior da massa de betão

O ensaio de teor de cloretos teve como principal objetivo avaliar a penetração de cloretos ao longo do tempo, em diferentes profundidades. Neste trabalho foram utilizadas duas profundidades, a profundidade de 1.5-3.0 cm e a de 3.0-4.5 cm. Analisando os resultados obtidos é possível concluir em primeiro que o teor de cloretos vai diminuindo conforme vai aumentando a profundidade.

A amostra 1, cura em água normal, não apresentou praticamente penetração de cloretos, enquanto a amostra 2 e amostra 3, cura em água do mar e cura em água do mar com cloreto de sódio na amassadura, apresentaram valores mais elevados. Comparando os valores obtidos com a norma NP EN 206, onde o valor máximo é de 0.2% cloretos presentes na massa de cimento, a amostra 1 foi a única a cumprir o requisito. A amostra 3 como apresentava cloreto de sódio na amassadura, no início do ensaio já apresentava elevada penetração de cloretos, em ambas as profundidades.

Neste estudo o objetivo era avaliar a penetração de cloretos pela superfície dos prismas de betão que continham as armaduras. Como a armadura ficava exposta nos topos foi colocada parafina em torno da armadura na sua ligação com o betão, de forma a evitar a corrosão das armaduras através da parte exposta da armadura nos topos. Como os provetes estiveram demasiado tempo em cura, a proteção acabou por não ser totalmente eficaz, tendo-se detetado casos em que a corrosão das armaduras ocorreu mesmo pelos todos do provete: as amostras 2 e 3, ambas no recobrimento 3 cm. Nestes casos, quando se abriu os provetes no final do período experimental, foi possível observar a penetração de cloretos pelos topos, afetando assim as armaduras e causando corrosão parasita, não desejada. Esta situação coloca apenas algumas reservas na interpretação da evolução da corrosão nestes casos.

Tendo por base os valores das leituras realizadas após abertura dos provetes é possível balizar os valores máximos plausíveis em termos de potencial de corrosão. Em termos globais verifica-se que a amostra 1, para o recobrimento de 3.0, apresenta valores onde existe probabilidade superior a 90% de não estar a ocorrer corrosão nas armaduras, enquanto na amostra 2 e 3 existe uma probabilidade superior a 90% de estar a ocorrer corrosão das armaduras. Verificou-se que a avaliação do potencial de corrosão é muito sensível ao estado de humidade dos provetes.

## **7.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Estender este estudo a betões com diferentes características, nomeadamente betões com características de exposição a ambientes agressivos, simulando outros tipos de ambientes de cura.

Melhorar a concessão dos provetes de forma a não ter evolução de corrosão em pontos onde não era desejável (tentar não deixar armadura exposta redefinindo a conceção dos provetes).

Complementar o estudo com uma caracterização exaustiva do betão em termos das suas características resistentes a diversos aspetos que influenciam o seu comportamento em termos de exposição ambiental.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ÂNGELA ESTRELA LOPES AMARAL (2012) *Teor crítico de cloretos para iniciação da corrosão do aço no betão*. ISEL.
- ASTM (2017) 'Standard Test Method for Corrosion Potential of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete'.
- CEN - Comité Européen Normalisation (2021) 'Betão - Especificação, desempenho, produção e conformidade'.
- GORETI SOFIA MARQUES DE SÁ SILVA (2010) *Durabilidade e Absorção por Capilaridade em Betão*. Civil. FEUP.
- Hussain, R.R. (2011) *Underwater half-cell corrosion potential bench mark measurements of corroding steel in concrete influenced by a variety of material science and environmental engineering variables, Measurement*. Elsevier. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2010.10.002>.
- João Miguel Espírito Santo Silva (2014) *Durabilidade do Betão. Caracterização de Amostras de Betão Recolhidas ao Longo de Dois Túneis da Região Autónoma da Madeira*. Universidade.
- Júlio Appleton (2013) *Estruturas de betão*. 1st edn. Orion.
- Kim, Y.Y. *et al.* (2014) 'Effect of cover depth, w/c ratio, and crack width on half cell potential in cracked concrete exposed to salt sprayed condition', *Construction and Building Materials*, 54, pp. 636–645. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.01.009>.
- LNEC (2007) 'Betões - Metodologia prescrita para uma vida útil de projeto de 50 a 100 anos face às ações ambientais'.
- MAFALDA VALADAS CODER BARBOSA (2013a) *O betão: Definição, caracterização e propriedades*. ISEL.
- MAFALDA VALADAS CODER BARBOSA (2013b) *O betão: Definição, caracterização e propriedades*. Civil. ISEL.
- MARIA BEATRIZ SILVA SANTOS FERREIRA (2017) *Análise experimental de estruturas de betão*. Civil. ISEP.
- M.H.F. Medeiro *et al.* (2017) 'corrosion Potential: Influence of moisture, water-cement ratio, chloride content and concrete cover'.
- na Suíça, F. (2012) *mais de 50 anos de know how que você pode medir! canin +*. Available at: [www.proceq.com](http://www.proceq.com).

TIAGO MANUEL HELENO DOS SANTOS (2014) *Corrosão das Armaduras do Betão Armado Causas, Consequências, Prevenção e Projeto de Durabilidade*. Civil. ISEL.

Valadas Coder Barbosa, M., Mestre Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva Engenheiro Licenciado José Carlos Franco Marques Júri, E. and Filipe Manuel Vaz Pinto Almeida Vasques Engenheiro Mestre Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva Engenheiro Licenciado José Carlos Franco Marques Engenheiro Mestre José Manuel Barrento da Costa, D. (no date) 'INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA Área Departamental de Engenharia Civil O betão: Definição, caracterização e propriedades Licenciatura em Engenharia Civil Relatório de Estágio para obtenção do grau de Mestre em Engenharia na Área de Especialização em Edificações Orientadores: Maio de 2013 ISEL'.

Vanessa Oliveira (2021) *Durabilidade do betão e Corrosão das armaduras*. Civil. Isep.