



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa

MODELOS DE GESTÃO DA DEGRADAÇÃO DE INFRAESTRUTURAS PORTUÁRIAS

Francisco António Cavalheiro Pina Simões Rodrigues

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Júri

Orientador: Prof. Pedro Miguel Vaz Paulo
Co-orientador: Prof. Fernando A. B. Branco

Júri:
Presidente: Prof. Jorge Manuel Calião Lopes de Brito
Vogal: Prof. João Paulo Janeiro Gomes Ferreira

Outubro de 2011

MODELOS DE GESTÃO DA DEGRADAÇÃO DE INFRAESTRUTURAS PORTUÁRIAS

RESUMO

A presente dissertação insere-se na área da durabilidade de infraestruturas portuárias, nomeadamente estruturas de betão armado, e tem como principal objectivo estudar a influência do ambiente e de determinados factores na degradação de infraestruturas de betão armado em diferentes ambientes.

Procedeu-se à caracterização dos principais factores e mecanismos de degradação intervenientes, definindo-se os que foram analisados nesta investigação.

Caracterizaram-se os ambientes em estudo (fluvial e marítimo), nomeadamente através da recolha de amostras de água e do estudo dos parâmetros climatéricos mais relevantes.

Procedeu-se à quantificação das estruturas, de forma visual através de elementos fotográficos e de acordo com o catálogo dos níveis de degradação desenvolvido, destacando-se os principais factores intervenientes nessa degradação.

Para uma maior fiabilidade da análise, foram recolhidas de amostras de pó de betão retiradas em diversas zonas e condições de exposição. Os resultados foram analisados de acordo com os requisitos regulamentares vigentes.

No decurso da investigação, foram inspeccionadas 22 estruturas localizadas em três locais distintos do País (Lisboa, Peniche e Nazaré).

DEGRADATION MODELS OF MARITIME INFRASTRUCTURES

ABSTRACT

The following research concerns the durability of port structures, namely reinforced concrete, and aims to study the influence of environmental and architectural factors in the durability of reinforced concrete structures exposed to both marine and fluvial environments.

The main factors and mechanisms involving concrete degradation were analyzed, and the ones studied in the present research were identified.

Both environments (marine and fluvial) were characterized by collecting water samples (for further analysis) and studying the relevant weather parameters in each one.

According to the degradation catalog developed to quantify the degradation levels, the structures were examined using photographic elements collected during the inspections. In each quantification the main factors regarding the degradation were identified.

For greater reliability analysis and to study chloride penetration, concrete powder samples were collected at different depths (1, 3 and 5cm) and exposure conditions. The results were analyzed and compared with the code limit.

During the course of the research, 22 structures in Lisbon, Peniche and Nazaré were inspected.

AGRADECIMENTOS

Com a apresentação da presente dissertação, queria agradecer a todos aqueles que de forma directa ou indirecta, contribuíram para a sua realização.

Agradeço ao Professor Pedro Miguel Vaz Paulo, meu orientador científico, pela sugestão do tema e profissionalismo que demonstrou para me auxiliar sempre que necessário e por todo o conhecimento transmitido ao longo da realização deste trabalho. Com a sua contribuição foi-me possível ultrapassar as inúmeras dificuldades surgidas ao longo do desenrolar dos diversos trabalhos desenvolvidos nesta dissertação.

Agradeço igualmente ao meu co-orientador, o Prof. Fernando Branco, pela sabedoria que partilhou não só ao longo do desenvolvimento desta dissertação, mas também durante as suas aulas às quais tive o privilégio de assistir.

Em todas as empresas envolvidas, nomeadamente, o Porto de Lisboa, o IPTM, a Fundação EDP, o Porto de Peniche e da Nazaré, a ETC – Terminais Marítimos S.A., o LNEC, um agradecimento especial a todas as pessoas que me ajudaram, possibilitando a oportunidade desta colaboração e o fornecimento de dados e partilha de conhecimentos necessários à realização do trabalho.

Um agradecimento ao Sr. Leonel Nogueira e à Sra. Natividade Luís do Laboratório de Química do IST, pelo tempo disponibilizado e apoio na execução das análises.

Aos meus pais, irmão e família, agradeço todo o afecto, dedicação, empenho e auxílio na minha formação enquanto pessoa e na forma como sempre ambicionaram que a minha carreira académica tivesse o maior sucesso possível.

Finalmente, agradeço aos meus amigos todos os bons momentos de convívio e à Sofia pelo carinho e apoio especial.

| | |
|---|-------------|
| ÍNDICE | |
| RESUMO | <i>i</i> |
| ABSTRACT | <i>iii</i> |
| AGRADECIMENTOS | <i>v</i> |
| Índice de figuras | <i>x</i> |
| Índice de quadros | <i>xii</i> |
| SIMBOLOGIA | <i>xiii</i> |
| ABREVIATURAS | <i>xiv</i> |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Enquadramento do tema | 1 |
| 1.2 Objectivos do trabalho | 2 |
| 1.3 Metodologia | 3 |
| 1.4 Organização do documento | 4 |
| 2. ESTRUTURAS DE BETÃO-ARMADO EM AMBIENTE MARÍTIMO/FLUVIAL | 5 |
| 2.1 Considerações iniciais | 5 |
| 2.2 Fase de projecto | 6 |
| 2.2.1 Projecto de durabilidade | 7 |
| 2.3 Fase de construção..... | 10 |
| 3. FACTORES DE DEGRADAÇÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO EM AMBIENTE MARÍTIMO/FLUVIAL | 13 |
| 3.1 Considerações iniciais | 13 |
| 3.2 Factores ambientais..... | 14 |
| 3.2.1 Condições de exposição..... | 14 |
| 3.2.2 Humidade relativa..... | 17 |
| 3.2.3 Água do mar | 17 |
| 3.2.4 Temperatura..... | 18 |
| 3.2.5 Vento | 19 |
| 3.2.6 Exposição solar..... | 19 |
| 3.3 Factores característicos ao betão..... | 20 |
| 3.3.1 Porosidade e permeabilidade | 20 |
| 3.3.2 Composição do betão | 21 |
| 3.3.3 Relação água/cimento..... | 22 |
| 3.3.4 Recobrimento | 24 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 3.3.5 | Cura e Compactação | 25 |
| 3.4 | Factores arquitectónicos | 26 |
| 3.5 | Resumo | 28 |
| 4. | <i>PRINCIPAIS MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO E ANOMALIAS</i> | 31 |
| 4.1 | Considerações iniciais | 31 |
| 4.2 | Mecanismo por ataque físico | 32 |
| 4.3 | Mecanismo por ataque químico | 33 |
| 4.3.1 | Sulfatos | 35 |
| 4.4 | Processo de corrosão das armaduras..... | 37 |
| 4.4.1 | Tipos de corrosão | 40 |
| 4.4.2 | Corrosão das armaduras (ataque por cloretos) | 42 |
| 4.4.3 | Corrosão das armaduras (ataque por carbonatação)..... | 45 |
| 4.5 | Principais anomalias e catálogo dos níveis de degradação | 47 |
| 5. | <i>METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO IN-SITU E LABORATORIAL</i> | 53 |
| 5.1 | Considerações iniciais | 53 |
| 5.2 | Metodologia do estudo | 53 |
| 5.3 | Identificação das estruturas analisadas..... | 55 |
| 5.2.1 | Ambiente fluvial | 56 |
| 5.2.2 | Ambiente marítimo..... | 57 |
| 5.4 | Dados climatéricos..... | 58 |
| 5.5 | Análise de amostras de água em diferentes ambientes | 62 |
| 5.5.1 | Análise e discussão dos resultados | 64 |
| 5.6 | Análise visual da degradação de estruturas em betão armado | 65 |
| 5.6.1 | Cais da Matinha (MA)..... | 66 |
| 5.6.2 | Cais do Museu da Electricidade (ME)..... | 69 |
| 5.6.3 | Cais da Ponte (PO) | 71 |
| 5.6.4 | Cais do Ginjal (CA)..... | 73 |
| 5.6.5 | Terminal Marítimo de Porto Brandão | 76 |
| 5.6.6 | Porto de Peniche | 78 |
| 5.6.7 | Porto da Nazaré | 82 |
| 5.7 | Análise do teor de cloretos | 84 |
| 5.7.1 | Metodologia para avaliação do teor de cloretos | 85 |
| 5.7.2 | Análise e discussão dos resultados | 87 |
| 5.8 | Síntese da investigação realizada | 89 |
| 6. | <i>CONCLUSÕES</i> | 93 |

| | | |
|------------|---|-------------------|
| 6.1 | Síntese da investigação efectuada..... | 93 |
| 6.2 | Conclusões gerais e trabalho futuros | 94 |
| | <i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i> | 97 |
| | <i>ANEXOS</i> | <i>i</i> |
| | Anexo I - Descrição dos métodos de análise de águas e cimento..... | <i>i</i> |
| | Anexo II - Apresentação dos valores climatéricos..... | <i>vi</i> |
| | Anexo III – Zonas de recolha e perfis de cloretos por cais | <i>xvi</i> |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 – Metodologia para implementação de um modelo para a previsão da vida útil..... | 8 |
| Figura 3.1 – Condições de exposição e mecanismos de deterioração num ambiente marítimo. | 14 |
| Figura 3.2 – Penetração de cloretos em betão a diferentes cotas acima do nível do mar..... | 16 |
| Figura 3.3 – Variação da percentagem de cloretos com a profundidade para diferentes zonas da estrutura | 16 |
| Figura 3.4 – Distribuição média dos sais na água do Oceano Atlântico. | 18 |
| Figura 3.5 – Efeito do uso de adições na profundidade de penetração de iões. | 22 |
| Figura 3.6 – Efeito da relação a/c na evolução da profundidade de penetração..... | 23 |
| Figura 3.7 – Propagação de fissuras consoante relação a/c (<i>w/c – water/cement</i>)..... | 24 |
| Figura 3.8 – Efeito do recobrimento no desempenho de durabilidade da estrutura. | 25 |
| Figura 3.9 – Influência de pormenores arquitectónicos no dimensionamento de estruturas.... | 27 |
| Figura 3.10 – Exemplo de forma a adoptar no dimensionamento de pilares em ambiente marítimo/fluvial. | 27 |
| Figura 3.11 – Acabamento aconselhável na execução de arestas salientes de pilares e lajes. . | 28 |
| Figura 3.12 – Degradação provocada pela presença de consola curta na laje da estrutura. | 28 |
| Figura 4.1 – Exemplo de corrosão com delaminação na parte inferior da laje de uma estrutura situada no estuário do Tejo..... | 32 |
| Figura 4.2 – Agentes físicos de degradação do betão..... | 33 |
| Figura 4.3 – Transporte de iões numa estrutura de betão armado em ambiente marítimo/fluvial..... | 34 |
| Figura 4.4 – Efeito do ataque por sulfatos..... | 36 |
| Figura 4.5 – Mecanismo de corrosão de armaduras em betão armado. | 37 |
| Figura 4.6 – Efeito do aumento de volume das armaduras no fendilhação do betão. | 38 |
| Figura 4.7 – Três fases no processo de corrosão de armaduras..... | 39 |
| Figura 4.8 – Tipos de corrosão e factores que provocam..... | 40 |
| Figura 4.9 – Influência do tipo de corrosão na perda de secção das armaduras..... | 42 |
| Figura 4.10 – Exemplo da evolução da % de cloretos ao longo do recobrimento de betão. | 43 |
| Figura 4.11 – Avanço do processo de carbonatação. | 45 |
| Figura 4.12 – Zonas envolvidas no mecanismo de carbonatação e variação do pH ao longo da profundidade..... | 46 |
| Figura 4.13 – Fases do mecanismo de corrosão. | 48 |
| Figura 5.1 – Localização das estruturas consoante o ambiente em que se encontram (AF – ambiente fluvial ou AM - ambiente marítimo)..... | 54 |
| Figura 5.2 – Localização das estruturas analisadas em ambiente Fluvial. | 56 |
| Figura 5.3 – Cais Museu Electricidade (ME). | 56 |
| Figura 5.4 – Cais do Ginjal (CA). | 56 |
| Figura 5.5 – Cais da Matinha (MA). | 57 |
| Figura 5.6 – Terminal Porto Brandão (PB). | 57 |
| Figura 5.7 – Cais da Ponte (PO). | 57 |

| | |
|--|------|
| Figura 5.8 – Localização das estruturas analisadas em ambiente marítimo..... | 57 |
| Figura 5.9 – Porto de Peniche (PE)..... | 58 |
| Figura 5.10 – Porto da Nazaré (NA)..... | 58 |
| Figura 5.11– Dados referentes às análises de águas das amostras recolhidas em determinados cais..... | 64 |
| Figura 5.12 – Planta satélite do Cais da Matinha..... | 66 |
| Figura 5.13 – Imagem Nascente da PC MA 1..... | 67 |
| Figura 5.14 – Imagem Poente da PC MA 1..... | 67 |
| Figura 5.15 – Imagem Nascente da PC MA 2..... | 68 |
| Figura 5.16 – Imagem Poente da PC MA 2..... | 68 |
| Figura 5.17 – Planta satélite do Cais do Museu da Electricidade (ME)..... | 69 |
| Figura 5.18 – Imagem Nascente da PC ME 2 no cais do Museu da Electricidade..... | 70 |
| Figura 5.19 – Imagem Nascente da PC ME 1 no Cais do Museu da Electricidade..... | 70 |
| Figura 5.20 – Planta satélite do Cais da Ponte (PO)..... | 71 |
| Figura 5.21 – Imagem Nascente da PC PO no Cais da Ponte..... | 72 |
| Figura 5.22 – Corrosão em pilar interior da PC PO..... | 72 |
| Figura 5.23 – Planta satélite do cais do Ginjal (CA)..... | 73 |
| Figura 5.24 – Representação da PC CA 1..... | 73 |
| Figura 5.25 – Representação da PC CA 3..... | 74 |
| Figura 5.26 – Delaminação de nível 3 no topo dos pilares da PC CA 3, zona atmosférica..... | 74 |
| Figura 5.27 – Delaminação do lado Poente da PC CA 2..... | 75 |
| Figura 5.28 – Planta satélite do Terminal de Porto Brandão (PB)..... | 76 |
| Figura 5.29 – Representação da PC PB 1 Nascente..... | 76 |
| Figura 5.30 – Exemplo de corrosão e perda de secção de nível 3 no Terminal de PB..... | 77 |
| Figura 5.31 – Imagem Poente da ES Porto Brandão..... | 77 |
| Figura 5.32 – Planta satélite do porto de Peniche (PE)..... | 78 |
| Figura 5.33 – Degradação na PCE PE do 3 lado Nascente..... | 79 |
| Figura 5.34 – Representação da PCE PE 3..... | 80 |
| Figura 5.35 – Degradação nível 1 (fissuração e alteração cromática) na PCE PE 7..... | 81 |
| Figura 5.36 – Planta satélite do porto da Nazaré (NA)..... | 82 |
| Figura 5.37 – Delaminação acentuada na PCE NA 1 Nascente..... | 83 |
| Figura 5.38 – Delaminação no CD NA 1..... | 83 |
| Figura 5.39 – Delaminação no CD NA 1..... | 83 |
| Figura 5.40 – Material utilizado na recolha de amostras de betão..... | 85 |
| Figura 5.41 – Exemplo do equipamento utilizado na execução das análises de cloretos..... | 86 |
| Figura 5.42– Perfil de cloretos para os cais considerados..... | 87 |
| Figura III.0.1 – Recolha de amostras no cais MA..... | xvi |
| Figura III.0.2 – Recolha de amostras no cais ME..... | xvii |
| Figura III.0.3 - Recolha de amostras no cais PE..... | xix |
| Figura III.0.4 – Recolha de amostras no cais NA..... | xx |

Índice de quadros

| | |
|---|------|
| Quadro 3.1 – Influência da humidade relativa no risco de corrosão. | 17 |
| Quadro 3.2 – Influência da relação a/c na porosidade capilar do betão. | 23 |
| Quadro 3.3 – Relação entre o tempo de cura e a difusão de cloretos. | 26 |
| Quadro 3.4 – Influência da compactação na difusão de iões cloreto (Cl ⁻) no betão. | 26 |
| Quadro 3.5 – Quadro resumo dos factores de degradação em ambientes marítimos/fluviais. | 29 |
| Quadro 4.1 – Valor do limite crítico em alguns países. | 43 |
| Quadro 4.2 – Estado de corrosão conforme o nível de pH no betão. | 46 |
| Quadro 5.1 – Localização e identificação de cada uma das estruturas estudadas. | 55 |
| Quadro 5.2 – Dados climatéricos referentes à zona do Estuário do Tejo. | 60 |
| Quadro 5.3 – Dados climatéricos para o Cabo Carvoeiro. | 61 |
| Quadro 5.4 – Influência dos parâmetros consoante a zona de estudo. | 61 |
| Quadro 5.5 – Principais iões no Oceano Atlântico. | 63 |
| Quadro 5.6 – Principais concentrações de iões em ambiente Fluvial. | 63 |
| Quadro 5.7 – Resultados das análises efectuadas às águas retiradas. | 64 |
| Quadro 5.8 – Quantificação da degradação do cais da Matinha. | 69 |
| Quadro 5.9 – Quantificação da degradação do cais do Museu da Electricidade. | 71 |
| Quadro 5.10 – Quantificação da degradação do cais da Ponte. | 73 |
| Quadro 5.11 – Quantificação da degradação do cais do Ginjal. | 75 |
| Quadro 5.12 – Quantificação da degradação do Terminal de Porto Brandão. | 78 |
| Quadro 5.13 – Quantificação da degradação do porto de Peniche. | 80 |
| Quadro 5.14 – Quantificação da degradação do porto de Peniche. | 81 |
| Quadro 5.15 – Quantificação da degradação do porto da Nazaré. | 84 |
| Quadro 5.16 – Quadro síntese da influência dos factores estudados. | 91 |
| Quadro II.1 – Dados climatéricos para estação da Tapada da Ajuda. | vi |
| Quadro II.2 – Valores do vento para a estação da Tapada da Ajuda. | vii |
| Quadro II.3 – Dados climatéricos para estação de Cabo Ruivo. | viii |
| Quadro II.4 – Valores do vento para a estação do Cabo Ruivo. | ix |
| Quadro II.5 – Dados climatéricos para estação de Sacavém. | x |
| Quadro II.6 – Valores do vento para a estação de Sacavém. | xi |
| Quadro II.7 – Dados climatéricos para a zona do Estuário do Tejo. | xii |
| Quadro II.8 – Valores do vento para a zona do Estuário do Tejo. | xiii |
| Quadro II.9 – Dados climatéricos para estação do Cabo Carvoeiro. | xiv |
| Quadro II.10 – Valores do vento para a estação do Cabo Carvoeiro. | xv |

SIMBOLOGIA

CaCl_2 – Cloreto de Cálcio

CO_2 – Dióxido de Carbono

OH^- - ião Hidróxido

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ – Hidróxido de Cálcio

CaCO_3 – Carbonato de Cálcio

FeCl_3^- – Cloreto de Ferro

$\text{Fe}(\text{OH})_2$ – Hidróxido de Ferro

Cl^- – ião Cloreto

e^- – electrão

H_2O – Água

Fe_2O_3 – Óxido de Ferro (III)

H^+ – ião Hidrogénio

Fe_3O_4 – Magnetite

O_2 – Oxigénio

Fe^{++} – ião Ferro

MgCl_2 – Cloreto de Magnésio

MgSO_4 – Sulfato de Magnésio

FeCl_3^- – Cloreto de Ferro

pH – potencial de hidrogénio iónico

C_3A – Aluminato Tricálcico

CaSO_4 – Sulfato de cálcio (gesso)

$\text{Mg}(\text{OH})_2$ – Hidróxido de magnésio

Al_2O_3 – Óxido de alumínio (Alumina)

$\text{Fe}(\text{OH})_3$ – Hidróxido de ferro (III)

C_4AF – Ferro aluminato tetracálcio

NaCl – Cloreto de sódio

HR – Humidade relativa

Relação a/c – relação água/cimento

ABREVIATURAS

ACI – American Concrete Institute
AF – Ambiente Fluvial
AM – Ambiente Marítimo
BRE – Building Research Establishment
BS – British Standards
CA – Cais do Ginjal
CD – Cais de Descarga
CEB FIP – Comité Europeen du Béton - Federation Internationale De La Precontrainte
CSIRG – Concrete materials and Structural Integrity Research Group
DBMC – Durability of Building Materials and Components
DIN – Deutches Institut fur Normung, Berling (RFA)
EDP – Energias de Portugal
EH – Norma Espanhola
EJSR – European Journal of Scientific Research
ES – Estrutura de Suporte
IPTM – Instituto Portuário e dos Transportes Marítimos
IST – Instituto Superior Técnico, Lisboa (Portugal)
JPEE – Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa (Portugal)
MA – Cais da Matinha
ME – Museu da Electricidade
NP – Norma Portuguesa
PB – Terminal Porto Brandão
PC – Ponte Cais
PCD – Ponte Cais Descarga
PCE – Ponte Cais Estacionamento
PE – Porto de Peniche
PN – Porto da Nazaré
PO – Cais da Ponte
PPGEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
RPEE – Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas
RRE – Reforço e Reabilitação de Estruturas
UFRGS – Universidade Federal Rio Grande do Sul, Rio Grande (Brasil)
ZA – Zona Atmosférica
ZM – Zona de Marés
ZR – Zona de Rebentação
ZS – Zona Submersa

1. INTRODUÇÃO

1.1 *Enquadramento do tema*

Este tema surge no contexto da durabilidade de estruturas de betão armado e da necessidade de uma melhor aplicação dos recursos, principalmente no ramo da construção de estruturas em ambientes marítimo e fluvial.

A reabilitação de estruturas de betão armado em ambiente marítimo e fluvial é um factor importante para o desenvolvimento económico e social de qualquer país. A construção e reabilitação deste tipo de estruturas requer, sem dúvida, um grande investimento nacional, pois consome parte considerável do orçamento de qualquer país que considere esse investimento central do posto de vista do apoio à actividade económica que quer promover.

Pelo facto de Portugal ser um país com extensa zona costeira, justifica-se e confirma-se a existência de um grande número de estruturas de betão armado situadas em ambientes junto ao mar. É fundamental perceber qual o comportamento destas estruturas e perceber o efeito dos factores de degradação na durabilidade das mesmas. Verificou-se nos últimos vinte anos um claro aumento do número de estruturas situadas perto do mar que apresentam deterioração precoce e perda de funcionalidade. Esta situação obriga a que sejam utilizadas verbas elevadíssimas na reabilitação das estruturas, situação a evitar nos dias de hoje.

Existiu nas últimas décadas um esforço adicional relativo à investigação dos principais parâmetros que controlam a penetração de elementos agressivos nas estruturas de betão, nomeadamente estudos referentes à sua quantificação. A necessidade de novos estudos prende-se com a ausência de uma correcta definição e quantificação dos factores para uma avaliação da vida útil das estruturas. O facto de a penetração de elementos agressivos apresentar uma clara dependência relativamente ao tempo e às condições de exposição, introduz dificuldades acrescidas na sua compreensão e quantificação (Costa, 1997). Os estudos desenvolvidos originaram um desenvolvimento significativo do conhecimento relativo aos mecanismos de deterioração. No entanto, o conhecimento dos parâmetros relacionados com o início e o desenvolvimento desses mecanismos é ainda qualitativo.

A necessidade de adoptar regulamentação que melhor traduza as condições do ambiente em redor das estruturas, veio ao encontro da regulamentação baseada em especificações, maioritariamente relacionadas com a composição do betão (quantidade mínima de cimento, máxima relação a/c, etc.) e ao recobrimento a adoptar. A experiência acumulada e o número de casos de estruturas com deterioração precoce, obrigaram a que se adoptassem novos pensamentos relativamente ao estudo dos mecanismos de degradação e da forma como estes se desenvolvem. Para isso, foi essencial aprofundar o conhecimento dos mecanismos de

deterioração e da forma como eles podem afectar a estrutura. É de facto através de uma melhor compreensão destes mecanismos de degradação, principalmente dos factores de iniciação e desenvolvimento da degradação, que se consegue projectar com maior durabilidade e vida útil.

A extensa bibliografia relativa às propriedades do betão (sua composição) para fazer face ao ambiente em estudo obriga a que, de forma complementar, se estude o efeito do ambiente e das condições de exposição (em Portugal) na deterioração das estruturas de betão armado.

A obtenção de estimativas concretas da vida útil de estruturas de betão armado em ambientes marítimos e fluviais não é o principal objectivo da presente dissertação. No entanto, pretende-se que o estudo dos factores e da degradação verificada nos cais estudados possa ajudar na quantificação dos parâmetros ambientais fundamentais para o projecto de durabilidade.

1.2 Objectivos do trabalho

O trabalho apresentado nesta dissertação insere-se no âmbito da contribuição nacional das instituições universitárias, para a actividade de investigação desenvolvida em torno das estruturas de betão armado sujeitas a ambientes agressivos como os que aqui são retratados.

Os objectivos principais deste trabalho são:

- verificar a degradação das estruturas e quantificá-la através do catálogo dos níveis de degradação;
- avaliar a influência dos factores ambientais (vento, insolação, etc.) e arquitectónicos nas estruturas;
- analisar a influência das composições químicas das águas nos diferentes ambientes e perceber de que forma podem influenciar a degradação de estruturas de betão armado;
- analisar a influência do posicionamento face ao nível do mar na degradação através da análise visual efectuada e através da recolha de amostras de pó de betão para estudo das quantidades de cloretos;
- verificar as diferenças de agressividade nos ambientes marítimos e fluviais.

Para atingir os objectivos referidos, foram desenvolvidas acções de levantamento dos elementos necessários *in situ* e posterior análise em laboratório das amostras recolhidas, através de métodos internacionais certificados.

1.3 Metodologia

A escolha do tema da presente dissertação foi motivada pela constatação da crescente preocupação em estudar os efeitos que os ambientes marítimos/fluviais têm na degradação das estruturas de betão armado. Esta temática é bastante discutida quer a nível nacional quer internacional pela importância que os custos resultantes das reabilitações destas estruturas tem na economia de cada país.

Numa primeira fase, foi recolhida informação sobre o “estado da arte”, procurando compilar informação sobre o desenvolvimento das fases de projecto e de construção, e da especificidade que relaciona os ambientes em questão. Reuniu-se a informação relativa aos principais factores de degradação presentes nestes tipos de ambientes, através da compreensão e caracterização dos mesmos por auxílio de estudos de diversos autores. Caracterizaram-se também os principais mecanismos de degradação presentes nas estruturas de betão armado e desenvolveu-se um catálogo de degradações para uma melhor quantificação da deterioração encontrada.

O mecanismo de corrosão, pelo seu maior significado prático, é objecto de uma análise mais aprofundada. Neste mecanismo, distinguem-se duas fases: a primeira é relativa à penetração dos agentes agressivos que causam a corrosão para o interior do betão; a segunda é relativa ao desenvolvimento da corrosão e às anomalias que advêm desse mecanismo. O trabalho de investigação refere-se essencialmente à segunda fase do mecanismo de corrosão, nomeadamente à análise das causas para o aparecimento de anomalias em determinadas zonas.

O contacto directo com profissionais com experiência na reabilitação e estudo de estruturas marítimas, proporcionou uma consciência adicional nesta temática. Apesar de ser uma área já largamente estudada por profissionais, a importância que uma boa gestão de recursos financeiros assume nos dias de hoje faz com que o estudo de todos os factores que influenciam a degradação seja fundamental para uma melhor aplicação desses recursos.

Numa segunda fase, procedeu-se à recolha de dados fundamentais para a abordagem do caso de estudo prático. Todos os dados e amostras recolhidas foram levantados pessoalmente entre o período de Fevereiro de 2011 e Agosto de 2011.

A informação necessária ao estudo efectuado em laboratório para o teor de cloretos resultou não só de um processo de pesquisa e de noções adquiridas ao longo da dissertação partilhadas pelo orientador, como da experiência e conhecimentos partilhados por elementos das várias empresas consultadas.

1.4 Organização do documento

O trabalho desenvolve-se para além deste capítulo inicial introdutório em mais 5 capítulos que organizam a informação recolhida e as diferentes fases que foram necessárias para a conclusão deste trabalho.

No **Capítulo 2**, faz-se uma revisão dos conhecimentos existentes sobre as estruturas de betão armado em ambientes marítimos/fluviais e abordam-se os aspectos gerais referentes à importância da fase de projecto e da fase de construção, nomeadamente a importância que cada um tem para a durabilidade deste tipo de estruturas.

No **Capítulo 3**, apresentam-se os principais factores responsáveis pelo desenvolvimento da degradação das estruturas, segundo a sua natureza. São ainda apresentados os factores abordados na análise das estruturas consideradas no trabalho.

No **Capítulo 4**, procede-se à apresentação dos principais mecanismos de degradação em ambientes fluvial e marítimo, com destaque à corrosão das armaduras por ser o mecanismo com maior significado neste tipo de ambientes. De seguida, desenvolveu-se um catálogo dos níveis de degradação relativo ao mecanismo de corrosão, onde são apresentadas 4 fichas de anomalias com a respectiva descrição, causas prováveis e níveis de gravidade considerados.

No **Capítulo 5**, são identificadas as estruturas analisadas para cada tipo de ambiente e a respectiva localização. Definem-se os parâmetros climatéricos fundamentais relativos ao ambiente e os seus valores médios. É apresentada a metodologia utilizada na recolha e análise das águas, com posterior interpretação dos resultados obtidos. Descreve-se a metodologia utilizada na análise visual das estruturas e apresenta-se, de acordo com o catálogo de degradação, o estado geral das estruturas. É igualmente apresentada a metodologia do trabalho de laboratório relativo às amostras de betão recolhidas, apresentando-se os resultados e interpretação dos mesmos. Por último, apresenta-se uma síntese dos resultados finais e uma análise do que se pode concluir a partir dos ensaios realizados.

No **Capítulo 6**, “Conclusões”, resumem-se as principais conclusões do trabalho e algumas propostas para o desenvolvimento do estudo no sentido de poderem vir a contribuir para a implementação de especificações mais precisas relativas à durabilidade e para a aferição dos parâmetros necessários à avaliação da vida útil das estruturas de betão armado.

O documento finaliza com uma secção de “Anexos” em que são reunidos dados de apoio às análises tomadas ao longo do desenvolvimento da investigação proposta.

2. ESTRUTURAS DE BETÃO-ARMADO EM AMBIENTE MARÍTIMO/FLUVIAL

2.1 *Considerações iniciais*

As estruturas de betão armado, particularmente as infraestruturas situadas em zonas sob influência marítima/fluviial, têm vindo a apresentar a curto prazo perda da sua funcionalidade, com custos de manutenção e de reabilitação elevados. Esta constatação evidencia a necessidade de serem introduzidas medidas preventivas, quer na fase de projecto e de construção de novas estruturas, quer na reabilitação das estruturas existentes. A adopção deste tipo de medidas preventivas deve ser suportada pela utilização de modelos de previsão da vida útil do betão armado, sendo o conhecimento da resistência do betão à penetração dos cloretos, dos teores críticos de cloretos e da evolução da velocidade de corrosão das armaduras, parâmetros determinantes nesta modelação (LNEC, 2008).

A introdução deste tipo de medidas, na fase de projecto, por um lado aumenta os custos dispendidos na concepção e construção da estrutura, mas por outro permite diminuir os custos de manutenção e reabilitação a longo prazo (factor relevante). Este aspecto é bastante importante nos dias de hoje dadas as verbas dispendidas por empresas na reabilitação de estruturas em ambientes marítimos/fluviiais, cujo mecanismo de degradação é a corrosão das armaduras.

Com o avanço das tecnologias de construção e do conhecimento referente às características e desempenho das estruturas de betão armado (área que há cerca de 30 anos era ainda desconhecida), a durabilidade deste tipo de estruturas tem vindo a aumentar significativamente. Assistiu-se igualmente nas últimas décadas ao desenvolvimento de novos modelos de estimativa da vida útil e de durabilidade que ajudaram a perceber quais as principais razões e fenómenos responsáveis quer pelo início, quer pelo desenvolvimento das degradações nestas estruturas.

Apesar dos diversos estudos nesta temática, este tipo de estruturas são extremamente susceptíveis a degradações. As razões subjacentes são diversas: desde uma má formulação do betão; falhas durante o processo de construção/monitorização, e ainda erros de projecto na definição dos materiais e arquitectura da estrutura para fazer face ao ambiente que a rodeia.

Neste capítulo, é reunida informação sobre os principais aspectos a ter em conta na fase de projecto e na fase de construção de uma estrutura de betão armado em ambiente marítimo/fluviial, de modo a prevenir e retardar a degradação e deterioração que este tipo de estruturas está sujeita.

2.2 Fase de projecto

Até há pouco tempo atrás, a única propriedade utilizada como parâmetro de controlo da qualidade do betão era a sua resistência mecânica nomeadamente à compressão. Porém, a necessidade de se construírem estruturas resistentes a ambientes de elevada agressividade fez com que fossem desenvolvidos betões com excelentes propriedades relacionadas com a trabalhabilidade, resistência e, principalmente, durabilidade (Silva e Liborio, 2005).

A experiência passada, o número de obras de reabilitação e reforço de estruturas marítimas atacadas por corrosão nos últimos anos (cerca de 95%) e a percentagem dos custos de construção dispendidos em reabilitações e reparações, revelam a necessidade de se adoptarem medidas excepcionais de prevenção e inibição relativamente ao principal mecanismo de degradação nas zonas marítimas, a corrosão (Salta, 2006). Val e Stewart (2003) afirmam que apesar dos custos utilizados na reparação e reabilitação de estruturas degradadas serem enormes, existe já um forte incentivo financeiro para uma melhor utilização dos recursos, não só nas estratégias de reabilitação, mas também durante a fase de projecto, construção e de manutenção de futuras estruturas, otimizando assim a vida útil e diminuindo os custos futuros.

As abordagens tradicionais utilizadas durante a fase de projecto baseiam-se em normas e especificações do tipo prescritivos, com requisitos para diversos parâmetros que controlam a qualidade do betão face às condições de exposição pré-definidas (Ferreira, 2006). Nas considerações que se tomam aquando da fase de projecto, não existe qualquer especificação relativamente à vida útil expectável, cabendo ao projectista estimar qual a vida útil esperada ao aplicar os requisitos das normas. Ferreira (2006) considera que o facto de o projectista assumir uma determinada vida de serviço longa mas não quantificada é uma situação inaceitável. O autor afirma ainda que a facilidade de aplicação deste tipo de normas pode, nalguns casos, tornar os projectos demasiados conservadores e noutros torná-los potencialmente perigosos. Na consideração de métodos prescritivos, existe também um problema relativo ao construtor, principalmente na escolha dos materiais e na correcta interpretação das medidas prescritas. Esta situação tem provocado divergências de opiniões relativamente à eficiência deste tipo de metodologia na fase de projecto.

A exigência de um formato de projecto que incorpore a durabilidade e vida útil nasceu do crescente interesse expresso pelos donos-de-obra em colocar exigências para a vida útil de serviço da estrutura (Ferreira, 2006).

Assume-se, desta forma, que devem ser adoptados no projecto modelos de estimativa da vida útil e de durabilidade. O desenvolvimento deste tipo de modelos ao longo das últimas

décadas, tem demonstrado um melhor desempenho quando comparados com os requisitos prescritivos usuais. Esta melhoria de desempenho relaciona-se por um lado com a melhor aproximação aos parâmetros ambientais e de durabilidade à abordagem probabilística, e por outro, prende-se com o facto de que a abordagem de modelos matemáticos e probabilísticos necessitem de ensaios e verificações do material específico em obra, enquanto as normas prescritivas assumem que essa verificação tenha sido efectuada, o que nem sempre garante a qualidade necessária para o produto final (Ferreira, 2006).

2.2.1 Projecto de durabilidade

O projecto de durabilidade surge como ferramenta fundamental para se assegurar a durabilidade da estrutura e o cumprimento da vida útil de projecto. Este tipo de metodologia permite ao projectista ajustar ou adaptar a estrutura de forma a enfrentar a agressividade ambiental, e conjugar estas considerações com a vida útil de projecto e com os custos totais da estrutura (Rostam, 2001).

Neste âmbito, o dono de obra deverá definir quais os requisitos pretendidos, incluindo a vida útil, durabilidade e um guia de monitorização e manutenção da estrutura, enquadrando-os com o orçamento disponível (Rostam, 2001). É essencial que todo o projecto esteja relacionado com a vida útil e com os custos totais da estrutura. Actualmente, começa-se a compreender que a durabilidade é parte essencial na qualidade e desempenho das estruturas e que o custo total inclui não só o custo de construção mas também o de manutenção e reparação (Ferreira, 2006).

Existem dois tipos de abordagens quando se projecta tendo como um dos requisitos a durabilidade. A primeira baseia-se em proteger a estrutura da agressividade do meio envolvente. A segunda consiste em seleccionar uma série de composições para os materiais, de forma a resistirem, durante um determinado período de uso específico à degradação da estrutura (Ferreira, 2006)

Na Figura 2.1, apresentam-se os passos recomendados para a definição de um projecto de durabilidade.

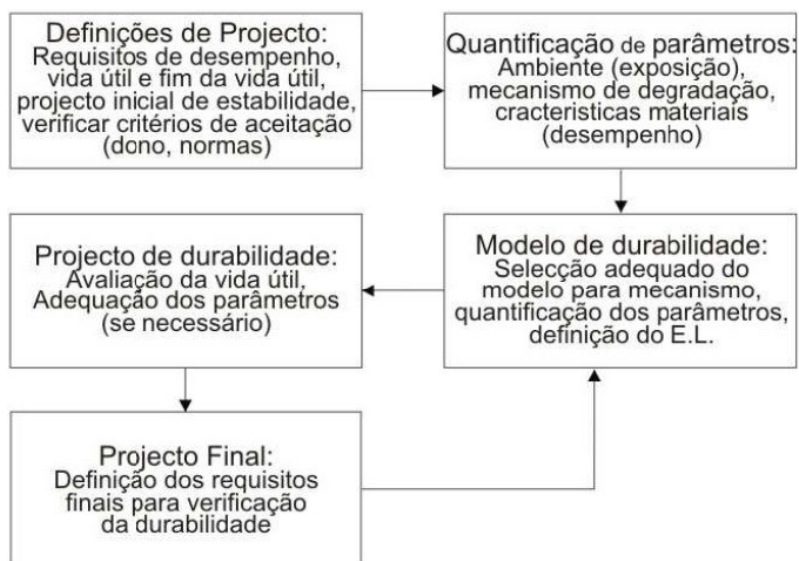


Figura 2.1 – Metodologia para implementação de um modelo para a previsão da vida útil (Ferreira, 2004).

De acordo com Ferreira (2006), o projecto de durabilidade deve basear-se em definições suficientemente realistas e precisas das acções ambientais, do tipo de degradação, dos parâmetros materiais para o betão e a armadura, e dos modelos realísticos para simulação do processo de degradação. O ponto de partida é a junção de toda a informação necessária para a implementação do modelo. Esta informação pode ser dividida em três grupos: o meio ambiente, a estrutura e o material (betão).

A análise do meio ambiente é crucial, pois é com base nesta informação que o carregamento ambiental é dimensionado. É necessário definir bem a localização da estrutura, identificar a direcção predominante dos ventos e quantificar a agressividade do meio (se necessário, recorrendo a estruturas vizinhas).

A análise do projecto de estabilidade fornece informação sobre a protecção da estrutura prevista. Deve juntar-se informação quanto à vida útil pretendida e o estado limite que o define, identificar os elementos estruturais de acordo com as classes de exposição, estudar as superfícies expostas e protegidas e ainda identificar o recobrimento nominal de projecto e o tipo de aço a utilizar. As propriedades dos materiais (betão) fornecem informação sobre a qualidade do betão a ser utilizado. A informação necessária é a classe de betão, a razão a/c, o tipo e quantidade de cimento, e se possível um indicador de durabilidade relevante.

Folic e Zenunovic (2010) consideram que existem nove parâmetros envolvidos no projecto de durabilidade:

- i. Definição do problema no início do projecto (tipo de estrutura, tempo de vida útil e condições de exposição);
- ii. Dosagem da mistura, nomeadamente a utilização de adições à pasta de cimento. Esta mistura deve ser estudada com atenção para não interferir negativamente na vida útil da estrutura;
- iii. Tipo de armadura, isto é, a utilização de vários tipos de armadura e protecção. O aço inox, protecção catódica, armadura revestida por película epoxy são exemplos de considerações que aumentam a vida útil;
- iv. Recobrimento. A qualidade e espessura do betão de recobrimento são os principais factores que afectam a durabilidade. A deterioração e corrosão das armaduras levam normalmente a perdas de aderência, fissuração e delaminação do betão de recobrimento;
- v. Controle de fendas. O aparecimento de fendas numa fase inicial gera no betão um estado de tensão interior que altera as propriedades estruturais;
- vi. Modelos de vida útil. A utilização deste tipo de modelos requer uma compreensão clara das reacções químicas e dos mecanismos de transporte e de degradação do betão. É fundamental que o modelo assumido seja verificado através de modelos matemáticos, testes em laboratório e *in situ*. Caso se verifique que a resposta do modelo não atinge os objectivos definidos pelo dono de obra, é necessário regressar novamente ao início (passo ii.) e redefinir os parâmetros;
- vii. Controlo de qualidade. Devem ser definidos procedimentos adequados para garantir a qualidade e controlo de qualidade de execução, duração e tipo de cura;
- viii. Qualidade de construção, controlando determinados parâmetros ao longo da execução da obra;
- ix. Manutenção/inspecção. Deve por último definir-se um plano que preveja as inspecções e manutenções.

Os autores afirmam que a adopção de um programa de inspecção é uma actividade com grande importância para perceber qual a resposta da estrutura ao ambiente. É importante que se realizem inspecções regularmente com o objectivo de definir o estado de degradação para a estrutura e quantificar a agressividade até à data da inspecção.

Do ponto de vista do projecto, uma alternativa possível para prevenir a corrosão de estruturas em ambientes marítimos/fluviais, pode passar por dimensionar as estruturas segundo a sua orientação geográfica, direcção da névoa marítima e da velocidade do vento, insolação, humidade relativa e posicionamento face ao mar (microclimas). Apesar de se julgar que todas as variáveis referidas têm influência no processo corrosivo, a complexidade de as interligar e as suas consequências para a estrutura, fazem com que ainda não exista nenhum estudo neste sentido. O processo de deterioração é um processo complexo e as inter-ligações entre todos os parâmetros é ainda pouco conhecido. O aumento da durabilidade para as estruturas de betão

armado é uma das preocupações relacionadas com a segurança, impacto ambiental e económico.

2.3 Fase de construção

Os métodos usados para construir estruturas de betão são diferentes dos usados noutros tipos de indústrias. O betão é um dos poucos materiais em que os ingredientes em bruto são armazenados perto ou no local de obra, onde são misturados, confeccionados e moldados no produto final que é a construção (Beleza, 1996).

A concepção e o método construtivo de estruturas de betão armado, neste tipo de ambientes, apresentam diversos problemas. Segundo a norma BS-6349-1:2000, podem destacar-se os seguintes:

- i. O trabalho pode ter de ser realizado permanentemente debaixo de água, onde a acessibilidade e visibilidade são baixas;
- ii. O trabalho pode estar ao alcance de ondas durante as marés e conseqüentemente sujeito à acção impacto, lixiviação e contaminação por água do mar;
- iii. O período entre marés, no qual o trabalho deve ser realizado, pode ser muito curto, sendo por vezes necessário trabalhar nos períodos de maré baixa durante a noite ou dia;
- iv. Os trabalhos temporários devem ser simples e de fácil montagem durante o período de marés, devendo ser suficientemente fortes para resistir a possíveis acções e cargas temporárias;
- v. A forma das estruturas deve ser simples, facilitando os trabalhos de colocação das cofragens e o desempenho destas relativamente à estanquidade e rigidez;
- vi. A pormenorização das armaduras deve ser de rápida leitura e de fácil aplicação em obra, sendo necessário que estas resistam aos deslocamentos impostos na betonagem e na compactação do betão. A adopção de recobrimentos apropriados e de espaçadores deve ser considerada para se obter uma boa colocação em obra.

Existe cada vez mais uma exigência para que todas as obras sigam as normas ambientais em vigência, sendo nesse âmbito importante a aplicação de planos de gestão ambiental para o efeito. Estes planos contemplam entre outros itens, a gestão dos resíduos resultantes da empreitada, com especial atenção ao seu armazenamento e encaminhamento para vazadouros autorizados. A execução dos trabalhos deve ser realizada em estrito cumprimento com as normas de segurança e saúde aplicáveis, não sendo de excluir um plano de segurança e saúde para o efeito.

Os materiais devem também obedecer às especificações dos elementos constantes no processo patentado a concurso, devendo o seu fornecimento, aprovisionamento e aplicação respeitar

os requisitos especificados para se conseguir um nível técnico de acordo com o estabelecido. Para além dos sistemas de gestão a implementar (qualidade, segurança e ambiente), devem efectuar-se ensaios para aferir as características mecânicas dos betões a aplicar.

A especificidade do tipo de construção, custos envolvidos, mão-de-obra não especializada e, na grande maioria das vezes, a necessidade de cumprir prazos apertados, leva a que por vezes os construtores não optem pelos métodos indicados na construção e descritos em projecto. Para Mackechnie (2001), a inconsistência nos métodos construtivos e na qualidade do betão final, são os principais responsáveis para que se continuem a verificar problemas de durabilidade em estruturas de betão armado em ambiente marítimo.

Infelizmente, continuam-se a verificar situações de degradação nas primeiras décadas da vida útil da estrutura muitas vezes causas da aplicação negligente de métodos impróprios por parte dos construtores. São igualmente verificadas situações em que os materiais descritos em projecto e aplicados em obra não são compatíveis. Por outro lado, a ausência ou negligência referente aos ensaios realizados *in situ* antes da aplicação do betão fazem com que não se possa aferir com certezas que a estrutura descrita em projecto, seja a estrutura construída. Estes aspectos estão normalmente associados ao preço final da obra. As situações descritas revelam a crescente importância da fiscalização durante a fase de construção na qualidade final desta.

Relativamente à construção, nomeadamente no concurso de obras públicas, o parâmetro “preço” é inevitavelmente o que maior peso tem na escolha do vencedor. Apesar da crescente melhoria nos modelos de avaliação de propostas, nomeadamente, pelo aumento do peso dado a parâmetros construtivos, verificam-se situações em que as obras são adjudicadas a empresas que, apesar de oferecerem um preço final mais baixo, apresentam métodos construtivos pouco rigorosos para fazer face às necessidades inerentes a este tipo de obra.

Existe ainda outro parâmetro responsável pela adopção de métodos impróprios: o prazo de conclusão da obra. Durante décadas, observaram-se inúmeros casos de atrasos, nalguns casos muito graves, que levaram não só a uma aumento avultado dos custos, mas também a problemas logísticos nomeadamente de organização. Para combater esta situação, assistiu-se à implementação de penalizações para os construtores, nos casos de atrasos no prazo de conclusão das obras. Esta situação leva a que existam construtores que optam por alterar os métodos construtivos, em especial, o tempo em que são implementados, para compensar possíveis atrasos no prazo final da obra. Os principais exemplos desta situação relacionam-se com a diminuição do tempo de cura e do tempo de cofragem a que as estruturas são submetidas. Esta situação tem claras implicações na qualidade final e durabilidade das estruturas.

Segundo Mackechnie (2001), más práticas construtivas relacionadas com a compactação, cura e colocação em obra, podem esconder os benefícios de um bom projecto estrutural e de

materiais adequados. Os estudos revelam que a adopção de curas húmidas leva a um melhor desempenho do betão de recobrimento. Existem já várias especificações para um melhor controlo destas actividades, no entanto, falhas de fiscalização e de métodos para monitorizar a obra fazem com que essas medidas continuem a não ser implementadas em obra. Segundo Battagin *et al.* (2002), neste tipo de ambiente existem duas exigências fundamentais para se obter um betão durável: tempo de cura e uma boa compactação. A cura é realizada por duas razões básicas: hidratar o cimento e reduzir ao máximo a retracção do betão (factores intrínsecos à durabilidade do betão), sendo as características superficiais do betão, como a permeabilidade e a ocorrência de fissuração, são as mais afectadas por tempos de cura inadequados no processo de construção. CCS (1962) afirma que devem ser tomados cuidados especiais na execução deste tipo de estrutura na zona de maré.

3. FACTORES DE DEGRADAÇÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO EM AMBIENTE MARÍTIMO/FLUVIAL

3.1 *Considerações iniciais*

As estruturas de betão armado sujeitas a ambientes agressivos têm demonstrado exemplos de deficiências na sua qualidade para fazer face à agressividade do meio ambiente que as rodeia. Estruturas normalmente projectadas para uma vida útil de 50 anos apresentam, em ambientes costeiros, sintomas de degradação significativos passados 20 a 30 anos da sua construção (Mehta, 2001).

Um dos aspectos responsáveis pela degradação acelerada deste tipo de estruturas é a existência de diversos factores capazes de alterar as características iniciais do betão e consequentemente dar início à degradação do mesmo. O início e evolução da degradação do betão é causada não apenas por um factor mas sim pela conjugação simultânea de vários factores. A avaliação da vida útil das estruturas expostas ao ambiente marítimo constitui um dos principais desafios que se colocam actualmente, quer relativamente a obras novas quer relativamente a obras existentes (Appleton e Costa, 1999a).

Não existem parâmetros simples que controlem a durabilidade do betão mas sim um certo número de factores (de maior ou menor complexidade) que a influenciam (Beleza, 1996). Estes factores podem ser agrupados consoante a sua natureza em: ambientais, intrínsecos ao material e arquitectónicos.

Quando se fala em factores de degradação neste tipo de ambiente, tem de se salientar em primeiro lugar a água do mar como o principal factor exterior de degradação uma vez que é através do contacto das estruturas com a água que o betão se vai degradar. A consideração dos factores característicos do material e dos factores arquitectónicos têm um sentido muito mais preventivo e de retardar o início da degradação, do que a água do mar e dos factores ambientais que são mais agressivos para a estrutura.

Neste capítulo, procede-se à explicação dos diferentes factores responsáveis pela degradação das estruturas em ambiente marítimo/fluvial, já agrupados consoante a sua natureza, sendo no final apresentado um quadro resumo de todos os factores descritos e dos que foram considerados neste trabalho.

3.2 Factores ambientais

A durabilidade de uma estrutura de betão armado ou pré-esforçado depende das interações entre o material com o meio circundante e da agressividade proveniente desse ambiente. Desta forma, é fundamental, mesmo em projecto, definir com a maior precisão possível o ambiente que rodeia a estrutura, englobando os vários agentes agressivos e o seu grau de agressividade.

3.2.1 Condições de exposição

Diversos autores afirmam que, no dimensionamento de estruturas deste tipo, devem ser estudados todos os factores que afectam a durabilidade da estrutura, em particular os factores ambientais e os micros climas que se geram neste tipo de condições (Costa, 1997).

O ambiente marítimo/fluvial tem de facto diversas particularidades, podendo-se distinguir claramente quatro condições de exposição (microclimas) diferentes. Estas condições afectam de forma diferente a estrutura de betão, dependendo da sua posição referente ao nível do mar. As degradações e os mecanismos inerentes a cada microclima de exposição são totalmente diferentes, sendo fundamental perceber de que forma e com que agressividade os agentes agressores vão influenciar a degradação da estrutura. Na Figura 3.1, distinguem-se as diferentes condições de exposição (microclimas marítimos) e respectivos mecanismos de deterioração. A consideração deste tipo de microclimas e dos mecanismos de deterioração respectivos foi utilizada ao longo deste trabalho, nomeadamente na análise feita durante a inspecção visual das estruturas.

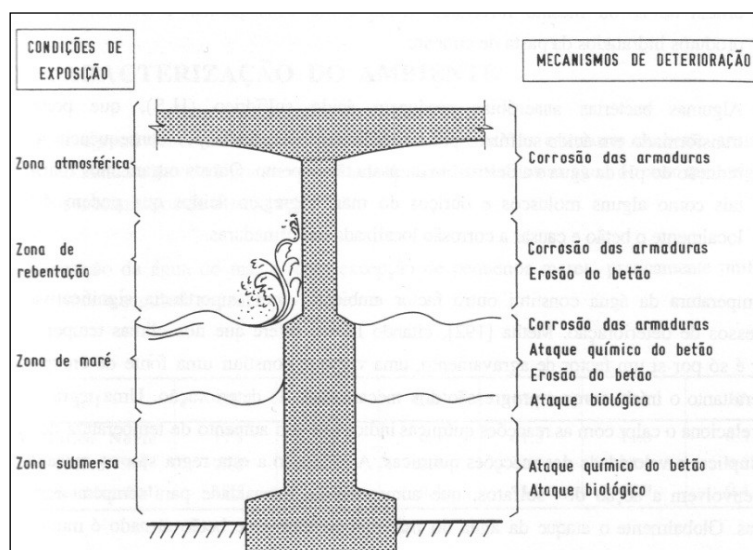


Figura 3.1 – Condições de exposição e mecanismos de deterioração num ambiente marítimo (Costa, 1997).

- Na zona atmosférica (**ZA**), acima do nível do mar, assume-se que não existe contacto directo do betão com a água do mar sendo os sais, provenientes das ondas e transportados pelo vento, os responsáveis pela exposição da estrutura aos agentes agressivos (Costa, 1997). O principal mecanismo de deterioração nesta zona é a corrosão das armaduras por acção dos cloretos transportados via aérea, sendo normalmente uma zona bastante afectada (Lima *et al.*, 2006). Podem ainda verificar-se fenómenos de carbonatação que não tendo só por si um carácter muito prejudicial para betão, quando conjugados com a corrosão acabam por funcionar como catalisadores da mesma. Nesta zona podem também inserir-se estruturas significativamente afastadas da costa, sendo que o grau de agressividade da névoa salina diminui com o aumento da distância ao mar (Medeiros *et al.*, 2010). Andrade (2001) considera ainda que a agressividade desta zona dependerá da percentagem de cloretos presente na água, da direcção e velocidade do vento no respectivo local.
- Ligeiramente mais abaixo pode identificar-se a zona de rebentação (**ZR**). Nestas secções, o betão encontra-se sujeito a ciclos de molhagem e secagem, situação ideal para o desenvolvimento acelerado de mecanismos de corrosão devido ao gradiente de temperatura e humidade constante (Liu, 1991). Caso as ondas do mar transportem materiais sólidos, pode verificar-se ainda erosão da superfície do betão, tornando-a mais vulnerável e reduzindo o recobrimento nessa zona (Costa, 1997).
- Na zona de maré (**ZM**), verificam-se igualmente ciclos de molhagem e secagem, no entanto o tempo de molhagem é bastante superior ao de secagem. Neste caso, e uma vez que o betão se encontra saturado durante grande parte do tempo (maré alta mais significativa que a maré baixa), a corrosão das armaduras não é tão acentuada. Por outro lado, e uma vez que o betão se encontra submerso durante diversas horas, podem manifestar-se sinais de ataque químico e biológico do betão (da Silva, 2007).
- Por último, na zona submersa (**ZS**), o betão encontra-se saturado, isto é, sem acesso a oxigénio, é normalmente de desprezar o mecanismo de corrosão (Vale e Stewart, 2003). Scannel e Sohanchpurwala (1994) e Odriozola e Gutiérrez (2007) afirmam que apesar do nível de cloretos presente exceder o valor necessário para se iniciar a corrosão, a ausência de oxigénio controla a taxa com que a corrosão se vai desenvolver. Contudo, podem nalguns casos surgir fenómenos de corrosão negra, sem ocorrência de reacções expansivas significativas e de fendilhamento no betão (RRE, 2011). Reúnem-se ainda condições para o desenvolvimento de ataques químicos, principalmente por iões magnésio ou sulfato, e biológicos causados por microrganismos (Andrade, 2001).

Coutinho, (1998) citando Concrete Society (1996), demonstra a importância do posicionamento face ao nível do mar na penetração de cloretos (Figura 3.2).

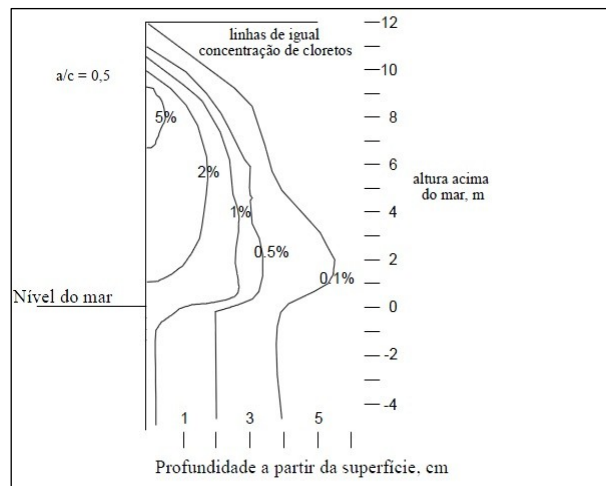


Figura 3.2 – Penetração de cloretos em betão a diferentes cotas acima do nível do mar (Coutinho 1998, citando Concrete Society).

Noutro estudo, Wall (2007) constatou que as zonas situadas acima da zona de maré alta apresentavam sinais de corrosão das armaduras superiores às restantes zonas. McCarthy e Giannakou (2002) avaliaram ainda a penetração de cloretos nas zonas (ZA e ZM) da estrutura. Na Figura 3.3, apresentam-se os resultados desse estudo.

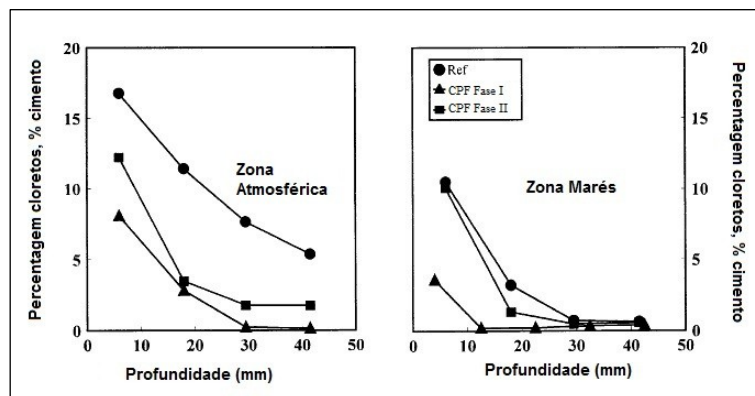


Figura 3.3 – Variação da percentagem de cloretos com a profundidade para diferentes zonas da estrutura (McCarthy e Giannakou, 2002).

A Figura 3.3 mostra que as concentrações mais elevadas dão-se, acima do nível médio do mar, na zona atmosférica. Segundo Sandberg (1998), existe uma relação linear entre a percentagem de cloretos livres e totais que foi encontrada em betões submersos ou expostos na zona de maré durante meio ano até dois anos. Os perfis de concentrações de iões cloretos e hidróxido ao longo do betão indicaram que estes penetram no betão em direcções opostas mas aproximadamente à mesma velocidade e quantidades.

3.2.2 Humidade relativa

Para Sandberg (1998), um dos principais factores que afectam a taxa de degradação de uma estrutura de betão armado é a humidade relativa. A HR controla o transporte de iões agressivos dentro do betão, afectando a degradação química e física do betão. A humidade relativa controla ainda a resistividade e acesso a oxigénio no betão. No Quadro 3.1, apresenta-se uma relação entre a humidade relativa e o risco de corrosão para o betão.

Quadro 3.1 – Influência da humidade relativa no risco de corrosão (adaptado de Ferreira, 2000).

| <i>Humidade relativa</i> | <i>Observações</i> | <i>Risco de corrosão</i> |
|--------------------------|--|--------------------------|
| 100% (Betão saturado) | Poros totalmente preenchido por solução hidróxido de cálcio que impedem o acesso de oxigénio | Sem corrosão. |
| 90% a 95% | Poros preenchidos com solução, pela qual o oxigénio deve circular até às armaduras | Risco baixo a médio |
| 60% a 90% | Poros preenchidos parcialmente permitem a deslocação de oxigénio e água | Risco elevado |
| Abaixo de 60% | Baixa quantidade de solução nos poros | Sem risco |

3.2.3 Água do mar

Quando se discutem os principais factores de degradação de estruturas de betão armado em ambiente marítimo/fluviál, é inevitável destacar a água do mar como o grande responsável por essa degradação. Percebe-se facilmente que os restantes factores ambientais vão potenciar a entrada da água do mar no betão. Deste modo, a água do mar é neste capítulo o grande responsável pela degradação das estruturas de betão armado.

As propriedades da água, nomeadamente a sua salinidade representam um grande perigo para as estruturas. Para Costa (1997), a agressividade química do ambiente marítimo deve-se principalmente aos sais que se apresentam dissolvidos na água do mar: cloreto de sódio (NaCl), cloreto de magnésio (MgCl₂), sulfato de magnésio (MgSO₄), sulfato de cálcio (CaSO₄), cloreto de cálcio (CaCl₂), cloreto de potássio (KCl), sulfato de potássio (K₂SO₄) e bicarbonato de cálcio (Ca(HCO₃)₂). Para Ferreira (2009), em ambiente aquático, podem-se destacar-se os iões presentes na água do mar como principais responsáveis pela degradação do

betão armado. A água do mar contém cerca de 35 (g/l) gramas de sais por litro de água, onde se destacam o cloreto e o sódio, Figura 3.4.

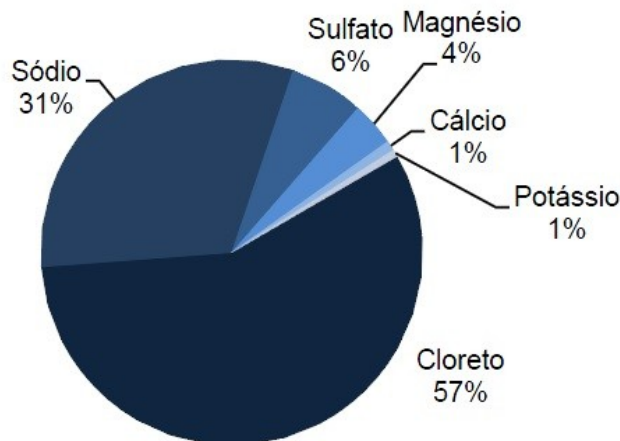


Figura 3.4 – Distribuição média dos sais na água do Oceano Atlântico (Coutinho, 1998).

Dada a grande importância do cloreto de sódio (não apenas em quantidade mas também em agressividade), o estudo da corrosão gerada por sais recai geralmente nesta substância, em particular nos cloretos. Outros sais, como os sulfatos, são igualmente agressivos, contudo, em ambiente marítimo vêm a sua acção neutralizada uma vez que os cloretos combinam-se com os aluminatos, formando cloroaluminatos (Ferreira, 2009).

3.2.4 Temperatura

A influência da temperatura no processo de difusão de cloretos em estruturas de betão armado é já um tema estudado, sendo, no entanto, a quantificação dessa influência ainda um aspecto em discordância no meio científico.

A temperatura tem influência no transporte de iões, nomeadamente no os cloretos responsáveis pelo início da corrosão e o seu desenvolvimento. Segundo Rincón *et al* (1998) a temperatura apresenta um papel duplo nos processos de deterioração. O seu aumento proporciona a mobilidade das moléculas, facilitando o transporte das substâncias. A sua diminuição pode dar lugar a condensações que, podem levar a aumentos importantes do teor de humidade do material. Quando aumenta a temperatura, diminui a humidade; quando diminui a temperatura, ocorre condensação de água nos capilares.

Em relação às condições de temperatura na zona de variação de marés e de rebentação, Lima *et al.* (2006) considera que estas são mais difíceis de serem descritas. Estas zonas são influenciadas pela temperatura do ar e da água do mar, e dos efeitos das marés, que podem expor partes da estrutura a ciclos de molhagem/secagem e calor/frio capazes de degradar a

estrutura. Neville (2000) considera também que o efeito causado pelo gradiente de temperaturas numa estrutura pode levar à ocorrência de fissuras em determinadas zonas. Este fenómeno verifica-se em zonas onde a diferença de temperatura entre a água do mar e o ar são de tal ordem que possam criar esses gradientes.

Para Andrade (2001) e Al-Khaja (1997), a temperatura tem uma influência negativa nas estruturas e essa situação explica a maior degradação de estruturas situadas em ambientes quentes. Por outro lado, Souza (2005), citando Cascudo (1997), refere que a temperatura poderá ter um papel duplo nos processos de corrosão por cloretos. Por um lado o aumento de temperatura aumenta a velocidade e a mobilidade iónica, no entanto a sua diminuição pode dar lugar a condensações que levem a acréscimos locais da humidade (Ferreira, 2004).

Para outros autores, o aumento da temperatura durante o tempo de cura vai diminuir o coeficiente de difusão dos iões cloreto, em função da melhoria das condições micro estruturais do betão.

3.2.5 Vento

O parâmetro vento deveria ser em muitos casos um dos factores mais importantes a considerar no dimensionamento. No entanto, são ainda poucos os estudos em que este factor é devidamente analisado.

Pontes (2006) considera que existe a necessidade de analisar, com mais profundidade, a interferência que a velocidade, direcção do vento exercem na penetração de agentes exteriores, uma vez que os resultados obtidos durante o seu estudo demonstraram pouca variabilidade nos valores obtidos. Salta (1996) afirma que para estruturas em ambiente marítimo a orientação dos ventos é um dos factores que tem influência na penetração dos agentes agressores. As zonas mais protegidas apresentam, em geral, maior intensidade de penetração do que as zonas expostas, pois estas últimas são também mais expostas às chuvas e, portanto, mais lavadas. Para Wall (2007), as zonas expostas a mar aberto, sem qualquer tipo de abrigo apresentaram um teor muito superior de cloretos quando comparadas com zonas mais abrigadas ou na direcção dominante do vento. Lima *et al.* (2006) refere que além de responsável pelo transporte de sais, o vento funciona como catalisador nos ciclos de molhagem/secagem das estruturas, favorecendo a penetração de sais para o interior do betão.

3.2.6 Exposição solar

O estudo do efeito da exposição solar na degradação das estruturas em ambiente marítimo é muito escasso. Sabe-se por analogia ao estudo efectuado para outros elementos de betão, por exemplo, fachadas e rebocos, que a incidência solar tem influência na degradação dos materiais. Contudo, ainda não existem estudos no sentido de quantificar a exposição solar e perceber a sua influência no processo de degradação. Wall (2007) refere que existem falhas durante a fase de projecto, nomeadamente na consideração dos efeitos climatológicos (incidência de luz solar e elevado acesso a oxigénio), que vão acelerar o processo corrosivo.

3.3 Factores característicos ao betão

Os parâmetros intrínsecos ao betão têm importância fundamental, na forma como este responde à agressividade que o rodeia, em particular à penetração da água do mar. A produção de betões com boa durabilidade não depende apenas de um único parâmetro, intrínseco ao material, mas sim da interacção e forma como estes são conjugados.

A complexidade na interacção dos parâmetros responsáveis pela durabilidade faz com que seja muito difícil afirmar, com certeza, qual o parâmetro do betão com maior importância na durabilidade das estruturas de betão armado em ambientes agressivos.

Apresentam-se, em seguida, exemplos de parâmetros essenciais e conjugações de parâmetros a adoptar na mistura para se obterem boas durabilidades em ambientes marítimos/fluviais.

3.3.1 Porosidade e permeabilidade

Os parâmetros porosidade e permeabilidade têm um peso enorme relativamente à qualidade do betão em causa uma vez que caso este seja bem dimensionado e aplicado em obra, isto é, apresente uma baixa porosidade e permeabilidade entre outras características, a estrutura estará em princípio pouco vulnerável ao ataque da água do mar.

Mehta (1980) considera que a capacidade da água do mar reagir com os produtos da pasta de cimento depende da capacidade que o betão apresenta em impedir a penetração da água para o seu interior. Neste sentido, Mehta considera que a permeabilidade de um betão é a propriedade mais importante do betão apresenta e é aquela que vai assegurar a sua durabilidade em ambientes agressivos. O autor afirma ainda que a permeabilidade do betão deriva principalmente da permeabilidade da pasta de cimento. Baixas quantidades de cimento e elevadas relações a/c produzem um betão bastante permeável relativamente à hidratação.

A porosidade de um betão é, no entanto, uma propriedade que depende de diversos factores, principalmente relacionados com a relação a/c e a utilização de aditivos. Segundo Ferreira

(2009), de modo a se obterem betões com baixas porosidades (o que terá particular importância na temática desta dissertação), será sempre necessário recorrer a relações a/c reduzidas, conciliando-as com tempos de cura elevados e boa compactação.

3.3.2 Composição do betão

Dentro das propriedades intrínsecas ao betão, as decisões tomadas em projecto e no processo de construção vão influenciar o desempenho final da estrutura. As opiniões sobre quais os parâmetros a considerar são concordantes mas a conjugação desses parâmetros é ainda alvo de discordâncias.

Segundo Neville (2000), o factor responsável pela maioria das degradações do betão é o cimento Portland. O autor afirma que apesar de se falar usualmente em retracção do betão, é a pasta de cimento hidratada quem sofre a retracção, provocando em muitos casos fissuras logo desde o início. No mesmo sentido, o autor refere que a fluência do betão se dá pela pasta de cimento hidratada e não pelos inertes do betão. O cimento Portland é ainda vulnerável ao ataque de iões provenientes do exterior e serve como meio de transporte destes até às armaduras. Neville afirma que, mesmo nos casos em que não exista ataque externo, as reacções dos alkalis presentes nos agregados se dão pela presença de água e o deslocamento se dará pela pasta de cimento. Apesar de não ser possível produzir betão sem cimento Portland, o autor considera fundamental que se adoptem outros materiais cimentícios na mistura (cinzas volantes, sílica de fumo, escórias de alto forno).

Ferreira (2000) considera que a densidade do betão, o tipo e a dosagem de cimento e desempenham um papel essencial na resistência do betão à água do mar. Relativamente à composição química do cimento, tem havido discussão quanto à acção do aluminato tricálcico (C_3A) na resistência ao ataque da água do mar. Costa (1997) refere que este constituinte do cimento tem um papel importante, sob o ponto de vista da durabilidade, relativamente ao mecanismo do ataque químico e ao mecanismo da penetração de cloretos. O C_3A constitui uma fonte de deterioração potencial, relativamente ao ataque dos sulfatos originando etringite (produto muito expansivo). No entanto, este fixa os cloretos, ao reagir para formar cloroaluminatos, diminui a concentração de cloretos livres e, deste modo, contribui para a protecção das armaduras. Para Ferreira (2000), betões produzidos com aluminato tricálcico (C_3A), cimentos super sulfatados, e aqueles que contêm adições minerais, tais como, micro sílica, comportam-se melhor.

Em relação ao tipo de cimento utilizado, Collepari (2008) estudou ainda a influência de adições minerais na penetração de cloretos em ambiente marítimo. Todas as amostras continham 350 kg/m^3 de cimento Portland e uma relação a/c de 0,45. O uso de adições minerais que substituam o cimento Portland por adições pozolánicas, cinzas volantes, escórias

de alto-forno ou sílica de fumo, reduziu a penetração de cloretos no betão. Por análise da Figura 3.5, Collepari afirma que o uso de 10% de sílica de fumo é mais efectivo que o uso de 25% de cinzas volantes ou de 25% de escória de alto-forno. No entanto, a utilização conjunta de 25% de cinzas e 25% de escórias apresenta melhores resultados que a utilização de 10% de sílica de fumo, material este muito caro e raro.

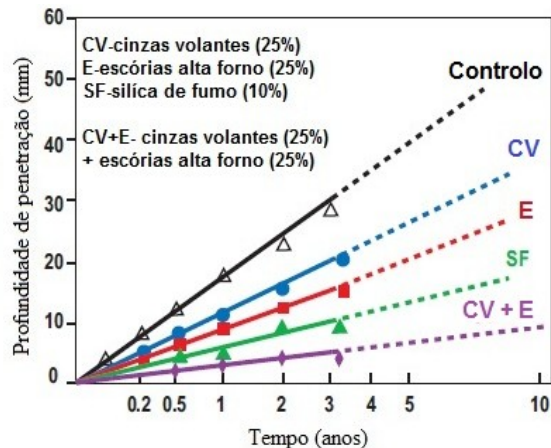


Figura 3.5 – Efeito do uso de adições na profundidade de penetração de iões (Collepari, 2008).

De acordo com Sanberg (1998), devem-se considerar betões de alto desempenho com 5-10% de micro sílica no cimento para fazer face à exposição ao ambiente marítimo/fluviat. Este betão teria grande resistência a penetração de cloretos e conseqüentemente baixas taxas de corrosão, resultado da elevada resistividade do betão.

3.3.3 Relação água/cimento

Costa (1997) e Beleza (1996) afirmam que a relação a/c controla os parâmetros permeabilidade e porosidade e, deste modo, a penetração de substâncias químicas e humidade.

Relativamente à influência da relação a/c na penetração dos cloretos, é de consenso considerar-se que uma diminuição da relação a/c vai proporcionar uma melhor durabilidade do betão e conseqüente redução da penetração de cloretos. Collepari (2008) estudou a influência da relação a/c para betões com 350 kg/m^3 , submersos durante 3 anos. Foram utilizadas 3 amostras de betão no estudo com diferentes relações a/c: 1- 0,6; 2- 0,45; 3- 0,30. Nas amostras com relação a/c mais baixa, foi utilizado superplastificante para reduzir a quantidade de água necessária. Pela Figura 3.6, o autor concluiu que a utilização de relações a/c com superplastificantes reduz significativamente a corrosão nas armaduras, uma vez que, para relações a/c mais baixas, a penetração de iões Cl^- é mais baixa.

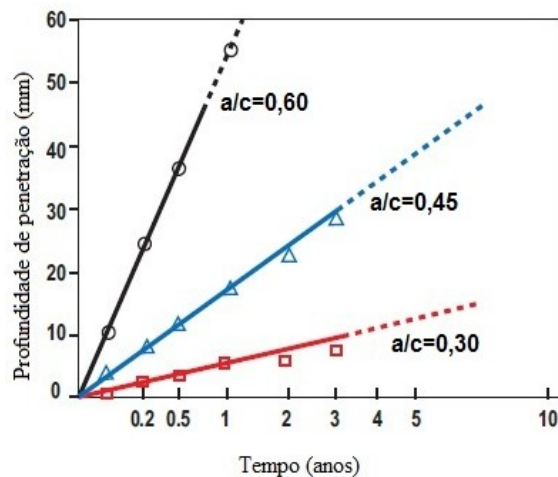


Figura 3.6 – Efeito da relação a/c na evolução da profundidade de penetração (Colleparidi, 2008).

A importância da relação a/c na evolução da carbonatação está relacionada com a permeabilidade do betão e conseqüente penetração do CO_2 no betão. Deste modo, betões com elevadas relações a/c produzem, normalmente, betões de pior qualidade relativamente à carbonatação, uma vez que para porosidades e permeabilidades mais altas, a difusão do CO_2 é maior. No Quadro 3.2, apresenta-se uma relação entre a relação a/c e a porosidade capilar do betão.

Quadro 3.2 – Influência da relação a/c na porosidade capilar do betão (Thaulow, 2007).

| <i>Relação a/c</i> | <i>% Porosidade capilar</i> |
|---------------------------------|-----------------------------|
| 0,40 | 8 |
| 0,45 | 14 |
| 0,50 | 19 |
| 0,55 | 24 |
| 0,60 | 28 |
| 0,65 | 32 |
| 0,70 | 35 |

Vu e Stewart (2002) estudaram a influência da relação a/c na durabilidade do betão e no aparecimento das primeiras fissuras. De acordo com os autores, observou-se que o aumento da relação a/c de 0,45 para 0,58, resultou num aumento da propagação de fendas de cerca de 30% a 40%. Observou-se ainda que a relação a/c influencia maioritariamente a propagação de fendas quando estas apresentam larguras na ordem de 0,15 mm a 0,3 mm. Na Figura 3.7, apresenta-se um gráfico dessas relações.

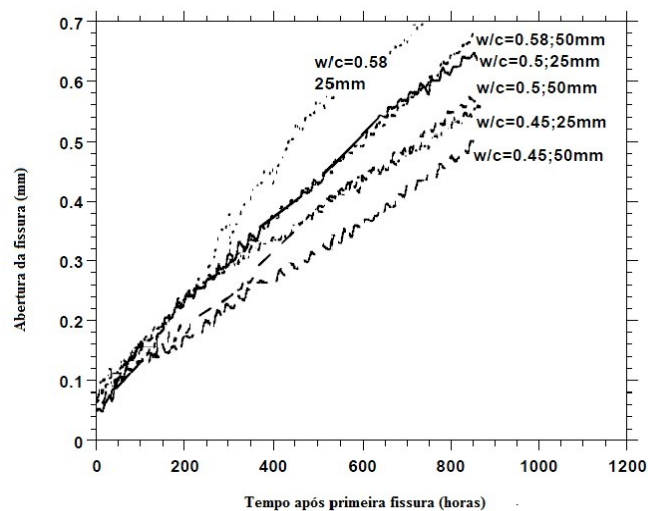


Figura 3.7 – Propagação de fissuras consoante relação a/c (w/c – *water/cement*) (Vu e Stewart, 2002).

Mehta (1980) considera que apesar da boa qualidade e execução em obra do betão, o aparecimento de fendas ao longo da vida útil torna o betão permeável relativamente à água do mar. As principais causas responsáveis pela formação de fendas são: a fluência devida ao excesso de carga, descuido no transporte de cargas, ciclos de gelo/degelo, corrosão das armaduras e reacções químicas expansivas.

3.3.4 Recobrimento

A espessura do recobrimento desempenha um papel muito importante na iniciação da corrosão e na taxa com que esta se desenvolve (Rashid et al., 2010). Um bom recobrimento das armaduras, associado a um betão de alto desempenho com um teor de argamassa adequado e homogéneo, garante, por baixa permeabilidade, a protecção das armaduras contra o ataque de agentes corrosivos externos (Helene, 1993). Costa (1997) refere que a espessura de recobrimento limita o acesso de oxigénio às armaduras e cria condições para que ao nível das armaduras exista um ambiente mais homogéneo.

Ghandehari *et al.* (1999) verificaram que a resistência à corrosão aumenta com o aumento do recobrimento e diminuição dos diâmetros das armaduras. Noutro estudo, Rashid *et al.* (2010) realizando testes para averiguar a influência do recobrimento do betão, na evolução da taxa de corrosão, verificaram que o aumento do recobrimento traduzia uma menor taxa de corrosão do betão. Na Figura 3.8, apresenta-se um esquema com a influência do recobrimento na corrosão das armaduras.

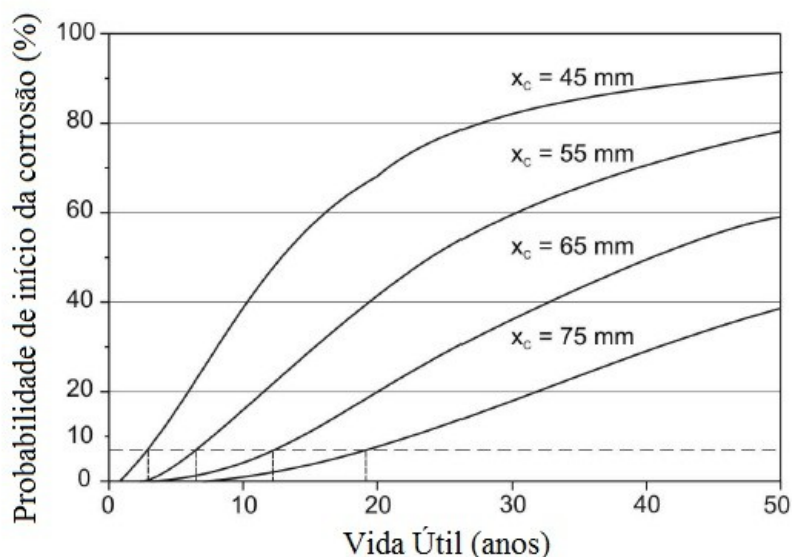


Figura 3.8 – Efeito do recobrimento no desempenho de durabilidade da estrutura (Ferreira, 2006).

Noutro estudo sobre o efeito do recobrimento, Mackechnie (2001) afirma que o aumento da durabilidade da estruturas é proporcional à adopção de recobrimentos na ordem de 50 a 75 mm. A utilização de recobrimentos baixos, mesmo para betões de alto desempenho, é bastante arriscada uma vez que, estes tipos de betões são muito vulneráveis a retracções na fase inicial e conseqüente aparecimento de fissuras. Costa (1997) afirma que a utilização de recobrimentos pequenos (inferiores a 50 mm) não é adequada para o ambiente marítimo, pois conduz a períodos de iniciação demasiado curtos para garantirem uma durabilidade adequada para as estruturas.

3.3.5 Cura e Compactação

Relativamente à influência dos processos construtivos na evolução da degradação, todo o processo deve ser realizado de forma cuidada, respeitando as normas existentes para uma execução segura e de acordo com o estipulado em projecto. Beleza (1996) refere que procedimentos incorrectos ou menor cuidado durante qualquer das fases da construção podem originar betões de menor qualidade que, por sua vez, podem contribuir para o desenvolvimento de mecanismos de degradação.

Para Odriozola (2007), o tempo de cura a que o betão é submetido apresenta uma influência na difusão dos cloretos. No Quadro 3.3, apresenta-se a relação entre o tempo de cura e a difusão (D) dos iões cloreto.

Quadro 3.3 – Relação entre o tempo de cura e a difusão de cloretos (Odriozola, 2007).

| <i>Tempo de cura (dias)</i> | <i>D ($\times 10^{-10}$ cm²/s)</i> |
|-----------------------------|--|
| 1 | 2,39 |
| 3 | 2,25 |
| 14 | 2,15 |
| 28 | 0,07 |

Helene (1993) e Battagin *et al.* (2002) afirmam que, quanto maior o período de cura (húmida) de um betão, maior será a sua permeabilidade e consequente resistência à penetração de iões agressivos. Nos ensaios feitos para três tipos de betões, com diferentes relações a/c, Battagin *et al.* concluíram também que a influência da relação a/c tem maior peso para a qualidade final do betão.

Odriozola (2007) afirma que, da mesma forma, o aumento da compactação leva a uma redução da difusão e da concentração de iões cloreto no betão. No Quadro 3.4, apresenta-se uma relação entre a % de compactação e a respectiva difusão (D) de cloretos no betão.

Quadro 3.4 – Influência da compactação na difusão de iões cloreto (Cl⁻) no betão (Odriozola, 2007).

| <i>Compactação (%)</i> | <i>D ($\times 10^{-10}$ cm²/s)</i> |
|------------------------|--|
| 100 | 2,183 |
| 60 | 3,436 |
| 40 | 5,149 |

3.4 Factores arquitectónicos

Devem igualmente considerar-se aspectos arquitectónicos no dimensionamento das estruturas, evitando que se desenvolvem mecanismos de degradação no início da vida útil da estrutura.

A forma dos elementos estruturais deve ser tal que conduza a uma drenagem adequada evitando a saturação do betão. Será, portanto, conveniente evitar a concepção de superfícies horizontais, por exemplo como na Figura 3.9, ou utilizar sistemas de protecção adicional, sobretudo em zonas submetidas a ciclos de molhagem/secagem.

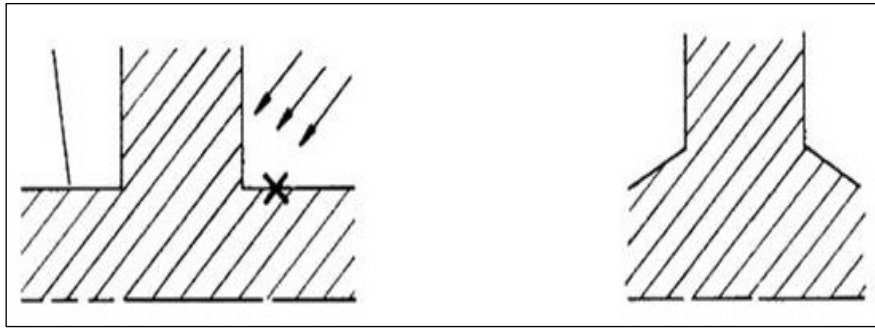


Figura 3.9 – Influência de pormenores arquitectónicos no dimensionamento de estruturas (Coutinho, 1998).

As superfícies de betão devem ser lisas e, em rebordos ou arestas salientes de elementos estruturais (nomeadamente pilares), as espessuras de recobrimento das armaduras devem ser respeitadas em ambas as direcções. Isto deve-se ao facto de os agentes agressivos penetrarem por ambos os lados do rebordo ou esquina (Coutinho, 1998).

Devem também evitar-se os elementos rectos nas arestas dos pilares e das lajes, como na Figura 3.10, evitando assim degradações impostas por acções accidentais, como por exemplo, impactos de barcos ou de cargas. Este é um aspecto já adoptado em grande parte das obras, sendo possível observar neste trabalho casos disso mesmo (Figura 3.11).

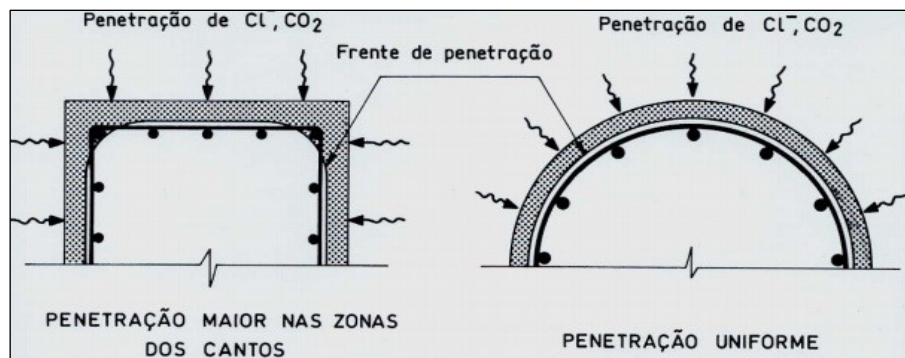


Figura 3.10 – Exemplo de forma a adoptar no dimensionamento de pilares em ambiente marítimo/fluvial (RRE, 2011).

A execução deste tipo de “acabamento” em arestas/rebordos de pilares e de lajes é menos prejudicial às estruturas, quando se verificam erros no processo de cofragem e de compactação, do qual resultam vazios, segregação e consequente redução do recobrimento nessa zona.



Figura 3.11 – Acabamento aconselhável na execução de arestas salientes de pilares e lajes (Arquivo pessoal).

A presença de consolas, mesmo com dimensões curtas vai criar na zona inferior da consola um desgaste acentuado provocado pela rebentação das ondas na parte superior dos pilares. É normal assistirem-se a degradações acentuadas quer nessas áreas, quer na zona superior do pilar por acção da presença dessas consolas, sendo desta forma de evitar a execução de estruturas com estas características. Na Figura 3.12, apresenta-se um caso deste tipo de consolas.



Figura 3.12 – Degradação provocada pela presença de consola curta na laje da estrutura (Arquivo pessoal).

3.5 *Resumo*

No capítulo 3, apresentaram-se os principais factores que condicionam a durabilidade das estruturas de betão armado em ambiente marítimo, subdivididos consoante a sua natureza.

Para uma análise mais expedita dos factores de degradação referidos e para se perceber o efeito nas estruturas, apresenta-se no Quadro 3.5 um resumo do referido durante o capítulo 3. Nesse mesmo quadro, podem ainda observar-se quais os factores estudados neste trabalho.

Quadro 3.5 – Quadro resumo dos factores de degradação em ambientes marítimos/fluviais.

| | <i>Factores de degradação</i> | <i>Principais características</i> | <i>Considerado no trabalho</i> |
|-----------------------------|-------------------------------|--|--------------------------------|
| Ambientais | Condições de exposição | Diferenças de agressividade consoante o posicionamento da estrutura face ao nível da água. | ■ |
| | Humidade relativa | Actua como catalisador da degradação casos em que os níveis de HR são favoráveis ao desenvolvimento de mecanismos. | ■ |
| | Água do mar | Diversidade de sais presentes na água do mar actua como agente de degradação do betão. | ■ |
| | Temperatura | As diferenças de temperatura do ar têm influência no processo de degradação. | ■ |
| | Vento | A velocidade e rumo do vento têm influência na degradação. | ■ |
| | Exposição solar | Tem importância nos ciclos molhagem/secagem e nos gradientes térmicos do betão. | ■ |
| Intrínsecos ao betão | Porosidade/permeabilidade | Fundamental para prevenir a entrada de agentes agressores. | |
| | Composição do betão | Influencia a forma como a estrutura se vai comportar face à agressividade do meio ambiente. | |
| | Relação a/c | Condiciona a porosidade e permeabilidade do betão. | |
| | Recobrimento | Condiciona a penetração de agentes agressores até às armaduras. | ■ |
| Arquitectónicos | Cura e compactação | Aconselhável para se obterem boas durabilidades do betão. | |
| | Forma da estrutura | Quando concebida de forma correcta, condiciona o desenvolvimento de mecanismos de degradação nas zonas mais vulneráveis. | ■ |

A justificação para a escolha dos factores a estudar no trabalho deve-se:

- ao facto de existir uma extensa bibliografia relativamente à influência das características intrínsecas ao betão na degradação em ambientes marítimos/fluviais;
- à ausência de dados fidedignos relativamente aos materiais utilizados na construção das estruturas consideradas no trabalho, principalmente as mais antigas (Estuário do Tejo);
- à falta de estudos que analisem a influência de cada um dos factores ambientais na evolução da degradação das estruturas;
- à necessidade manifestada por diversos autores de se perceber a ligação de todos os intervenientes ambientais e o efeito que estes têm nas estruturas;
- ao facto de se ter considerado o parâmetro recobrimento no estudo da degradação, uma vez que este é de fácil medição, e tem um papel importante na penetração dos agentes agressores;
- à lacuna de estudos no que diz respeito à influência dos factores arquitectónicos no desenvolvimento de mecanismos de degradação nas estruturas.

4. PRINCIPAIS MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO E ANOMALIAS

4.1 *Considerações iniciais*

A conjugação dos factores referidos no Capítulo 3 vai potenciar o desenvolvimento de mecanismos de degradação no betão. A velocidade e a agressividade com que estes mecanismos se vão desenvolver dependem normalmente das propriedades inerentes ao betão e da forma como este permite a entrada dos agentes agressores na sua matriz.

O betão apresenta-se usualmente como um excelente meio de protecção das armaduras, uma vez que em primeiro lugar funciona como barreira a penetração de substâncias agressivas para estas, e em segundo porque que quando concebido de forma correcta gera no seu interior um ambiente com elevada alcalinidade que impede a corrosão do aço (Costa, 1997). A presença, em concentrações elevadas de hidróxido de cálcio e o pH elevado criado neste tipo de ambiente (12,5-13,5) acabam por criar uma película passivante de óxido de ferro, sendo a corrosão, nestas condições, quase inexistente (Ferreira, 2000).

Para Lima (2006) e Costa (1997), a agressividade do ambiente marítimo às estruturas de betão deve, assim, ser dividida em dois mecanismos de degradação: um relativo à degradação química do betão por acção dos sais agressivos; outro pelos processos de corrosão das armaduras, devido à presença de iões cloreto e a alta humidade do ambiente. Destes dois, o principal mecanismo responsável pela degradação das estruturas em ambiente marítimo/fluvial é o mecanismo de corrosão (Costa, 1997). São normalmente definidas duas formas de corrosão: ataque por cloretos e ataque por carbonatação.

Considerou-se igualmente importante perceber a influência do ataque físico neste tipo de estruturas, nomeadamente devido à erosão da água do mar e de acções acidentais de barcos e cargas.

Em seguida, na Figura 4.1, apresenta-se um exemplo de corrosão de armaduras de uma ponte cais estudada no trabalho.



Figura 4.1 – Exemplo de corrosão com delaminação na parte inferior da laje de uma estrutura situada no estuário do Tejo (Arquivo pessoal).

Na maioria dos casos, a deterioração por ataques físicos e químicos está interligada, sendo a separação entre causas e efeitos de difícil compreensão. Nestes mecanismos, deve considerar-se, tal como nos factores de degradação, um reforço mútuo entre ambos os ataques, isto é, as interacções entre os mecanismos acabam por catalisar o desenvolvimento de degradações nas estruturas (Vilasboas, 2004)

Os mecanismos de degradação vão alterar a capacidade do material em desempenhar as suas funções como definidas em projecto. Podem destacar-se quatro principais anomalias: alteração cromática, fissuração, delaminação e a perda de secção das armaduras (Lapa, 2008). Estas anomalias podem surgir isolada ou simultaneamente, sendo no entanto normal que se manifestem de forma sequencial, como mencionadas acima.

A análise das anomalias, bem como a quantificação da sua gravidade, serão abordadas neste capítulo.

4.2 Mecanismo por ataque físico

O ataque físico ao betão tem um papel importante na estrutura uma vez que, apesar de não ser particularmente destrutivo, acaba por criar condições para que outros mecanismos (corrosão) se desenvolvam com maior facilidade. Mehta e Monteiro (1994) consideram que no ataque físico do betão os principais mecanismos são: desgaste superficial por acção das ondas; e a fissuração devido a gradientes de temperatura e carregamentos estruturais. Na Figura 4.2, apresenta-se um resumo deste mecanismo de degradação do betão.

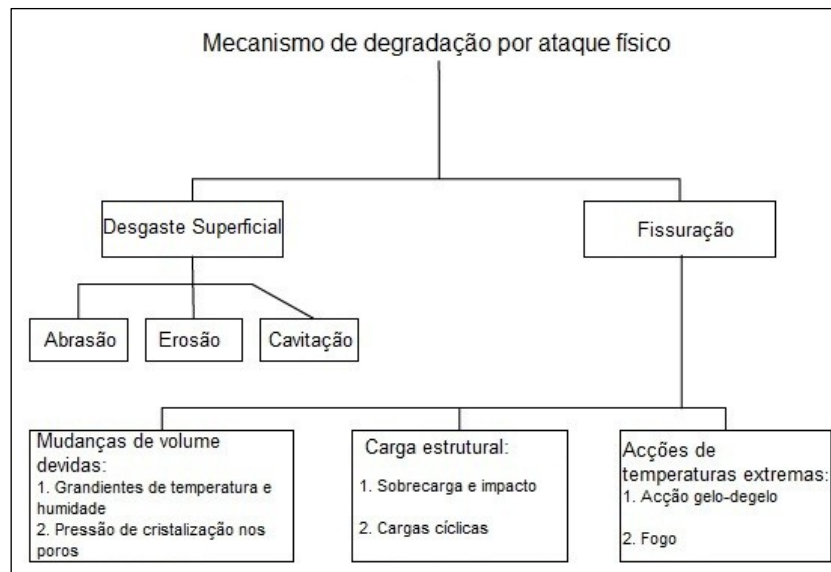


Figura 4.2 – Agentes físicos de degradação do betão (Mehta e Monteiro, 1994).

Para Lima (2006), as ondas actuam na degradação das estruturas através do desgaste superficial provocado pelo impacto contínuo. A variação das marés afecta, além da estrutura exposta ao ar livre que recebe água do mar directamente ou por salpicos através do vento, também as partes das estruturas que estão sujeitas às variações do nível freático (zona submersa). Este tipo de mecanismo torna a superfície do betão mais vulnerável ao ataque dos sais que vão reagir com a pasta do cimento, sendo normal assumir-se uma perda de recobrimento efectivo nessa área (Mehta e Monteiro, 1994).

De salientar que a variação das marés no oceano é geralmente pequena, quase sempre menor do que 1 m. No entanto, próximo à costa essa variação pode chegar a mais de 5 m (Lima, 2006) e, nos casos em que a estrutura não esteja abrigada, como em portos, tem um impacto superior na qualidade das estruturas.

Por último, podem-se destacar acções acidentais, como por exemplo o impacto de barcos durante a acostagem aos cais. Esta situação foi visível durante as visitas efectuadas nos cais que ainda se encontram em funcionamento e pode ter consequências graves na durabilidade das zonas afectadas.

4.3 Mecanismo por ataque químico

O ataque químico dos componentes do cimento pela água do mar é um fenómeno complexo uma vez que nele intervêm variadíssimos iões presentes na água e diversos componentes da pasta de cimento (Costa, 1997). A grande maioria dos problemas relacionados com este tipo de ataques surge com a penetração de agentes agressivos para o interior do betão,

demonstrando assim a importância que a permeabilidade, referida no Capítulo 3, assume neste tema.

Existem diversos mecanismos de penetração no betão, sendo usual que estes se combinem entre eles (Coutinho, 1998). Os processos apresentados na Figura 4.3 são a difusão, a absorção/sucção por capilaridade e a permeação (Andrade, 2001).

- Difusão. Este mecanismo consiste na movimentação de iões no interior do betão e verifica-se quando existe um gradiente nas concentrações de cloretos no interior do mesmo. A difusão dos cloretos dá-se em ambientes saturados, com humidades relativas elevadas e a velocidade de difusão é proporcional à quantidade de água nos poros do betão.
- Absorção ou sucção capilar. Manifesta-se na zona de marés, onde a estrutura está sujeita a ciclos molhagem/secagem e ao evaporar-se a água deposita os cloretos nos poros do betão. Durante o período de molhagem, verifica-se sucção capilar da água do mar e conseqüente depósito de cloretos na superfície do betão. Durante a secagem, a água evapora-se e os cloretos permanecem no betão (Odriozola, 2007). Este ciclo de molhagem/secagem produz no betão um claro aumento da quantidade de iões cloreto na superfície.
- Permeação. Manifesta-se quando a estrutura está submetida a líquidos ou gases com diferenças de pressão e tem significado em estruturas sujeitas a pressões hidrostáticas. Por outro lado, e caso as estruturas permaneçam sempre submersas, a ausência de oxigénio acaba por limitar a corrosão das armaduras.

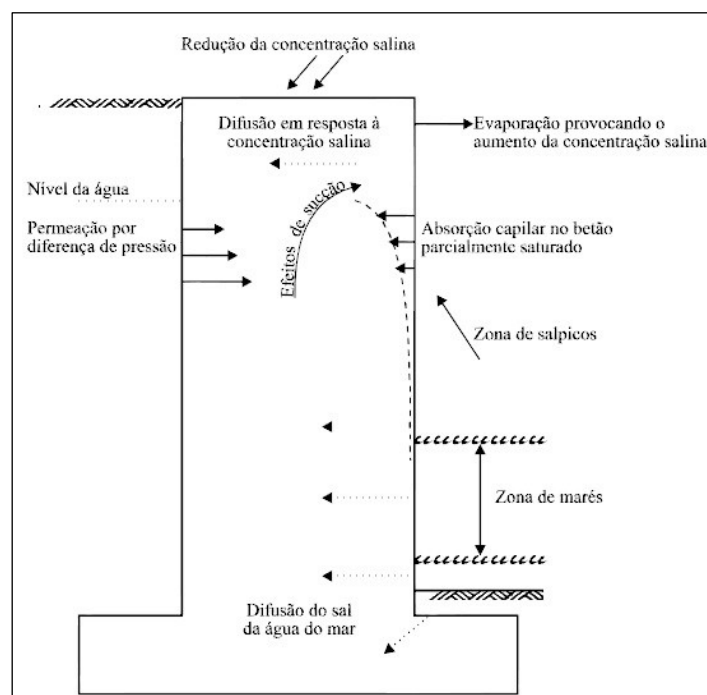


Figura 4.3 – Transporte de iões numa estrutura de betão armado em ambiente marítimo/fluvial (Coutinho, 1998 citando Concrete Society 1996).

Após diversos estudos relativamente à degradação de betão em contacto com a água do mar, Mehta (1980) afirma que o betão cimento Portland apresenta um potencial de degradação resultante de produtos de hidratação, nomeadamente o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). A vulnerabilidade deste composto, quando em contacto com os determinados componentes da água do mar e exteriores revela a necessidade de se produzirem estruturas duráveis e com baixas permeabilidades.

Para um betão submetido à acção da água do mar, é normal considerarem-se como principais sais agressores os sulfatos e os cloretos. Ambos os sais tendem a reagir com os produtos hidratados da pasta de cimento, com conseqüente formação de produtos expansivos (prejudiciais à durabilidade do betão). No entanto, as reacções dos iões cloreto e o desenvolvimento da corrosão são mais frequentes e gravosos neste tipo de ambiente.

Apesar de se considerar que o mecanismo de corrosão é um mecanismo químico de ataque ao betão, a sua relevância na degradação do betão levou a que se considerasse este mecanismo à parte dos restantes.

4.3.1 Sulfatos

O ataque por parte dos sulfatos pode diminuir significativamente a resistência do betão através das reacções levadas a cabo durante o ataque químico. O ião sulfato ataca os aluminatos do cimento Portland endurecido formando-se etringite e gesso. No caso de a água presente ser suficiente, a reacção com formação de etringite é muito expansiva e bastante gravosa para o betão (Coutinho, 1998).

O ataque de sulfatos é normalmente diagnosticado quando o betão apresenta já sinais físicos de degradação, tais como expansão (com ou sem delaminação), erosão superficial e dissolução da matriz da pasta de cimento (BRE, 2005).

As reacções dos sulfatos com a pasta de cimento podem ser de tal modo expansivas que o produto final pode ter um volume duas vezes superior ao inicial. Esta situação acaba por gerar elevadas tensões internas, com conseqüente fissuração do betão. Uma vez fissurado, a penetração e o avanço de agentes exteriores é facilitada. A Figura 4.4 apresenta um exemplo do ataque por sulfatos.

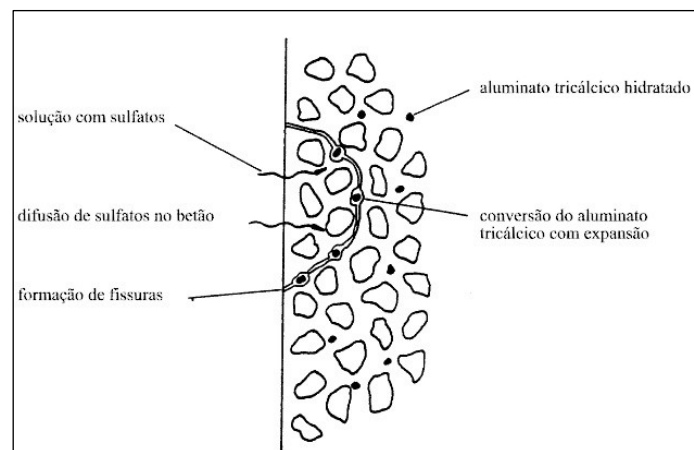
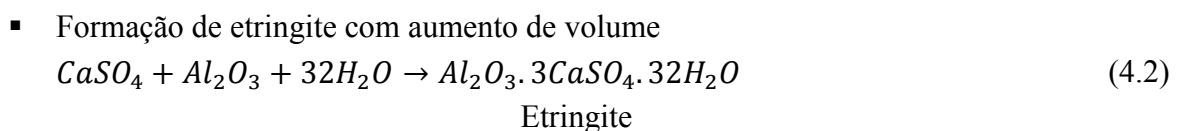
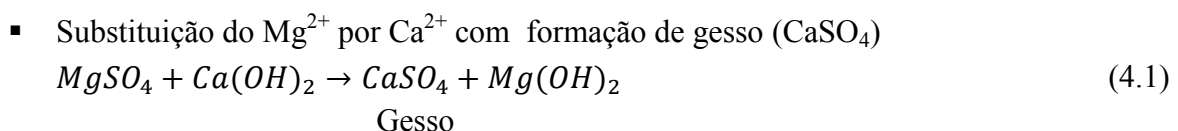


Figura 4.4 – Efeito do ataque por sulfatos (Coutinho, 1998 citando CEB).

As principais razões para este tipo de ataque se desenvolver são: quantidade de sulfatos no ambiente; permeabilidade do betão; tipo de cimento; quantidade de água disponível (Coutinho, 2001).

Para Coutinho (2001), os cimentos Portland resistentes a sulfatos, os cimentos pozolânicos (> 30%) e os cimentos com escórias (> 65%) são os que oferecem maior resistência mas não tornam o betão imune ao ataque por sulfatos. As medidas de protecção mais utilizadas para combater esta situação são o grau de impermeabilidade (redução da relação a/c) e a escolha do tipo de cimento (principal cuidado com a escolha de agregados com alumina e de cimentos com percentagens de C_3A elevadas). Segundo o mesmo autor, as soluções de sulfatos podem reagir com o aluminato tricálcico (C_3A) do cimento hidratado ou com a alumina (C_3S) do agregado, causando expansões, fissuração, delaminação do betão, amolecimento e desintegração. Para Coutinho (1998), em ambientes agressivos a degradação resultante do ataque por sulfatos, para uma determinada dosagem de cimento, depende claramente do teor de C_3A (aluminato tricálcico) desse cimento.

As reacções (4.1) e (4.2) intervenientes neste processo são:



Para Coutinho (1998), a reacção (4.2) pode ser de tal modo expansiva que o volume final seja duas vezes e meia o inicial, causando tensões internas e fissuração irregular do betão, facilitando o avanço da degradação.

4.4 Processo de corrosão das armaduras

O mecanismo de corrosão é um processo electroquímico que ocorre em meio aquoso, como resultado da formação de uma pilha ou célula de corrosão (Figura 4.5). Este processo depende da presença de oxigénio, diferença de potencial e de um electrólito para se desenvolver, sendo que a ausência de qualquer um dos factores referidos condiciona o início do mecanismo (Polito, 2006).

Segundo Helene (2003), os factores que levam a este mecanismo estão associados fundamentalmente às características do betão, ao meio ambiente e à disposição das armaduras e componentes estruturais.

Como referido, este mecanismo é activo através das diferenças de potencial existentes ao longo da armadura. Para Costa (1997) identificam-se duas zonas distintas junto às armaduras: a anódica, formada pelas armaduras já despassivadas; e a catódica, onde as armaduras têm acesso a oxigénio (O_2) (Figura 4.5). Neste mecanismo, as armaduras funcionam como condutores eléctricos e o betão actua como electrólito, isto é, condutor iónico que envolve as zonas anódicas e catódicas.

Numa primeira fase, ocorre a dissolução do ferro na zona anódica, passando através da solução os iões Fe^{++} (4.3). Libertam-se ainda dois electrões que através da armadura se deslocam no sentido ânodo-cátodo. Já na zona catódica, ocorrem reacções entre os electrões e o oxigénio e água, libertando-se iões hidróxido (OH^-) (4.4). Uma vez libertados, os hidróxidos tendem a transitar para a zona anódica através do betão, completando o circuito eléctrico e fortalecendo a película passiva junto ao cátodo (adaptado de Costa, 1997).

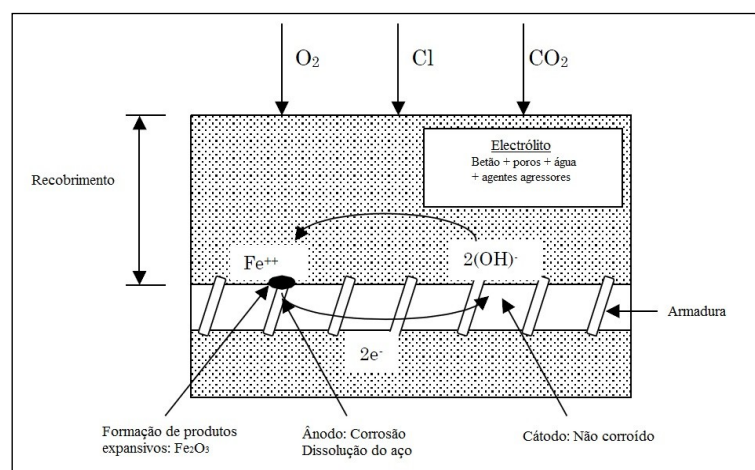


Figura 4.5 – Mecanismo de corrosão de armaduras em betão armado (adaptado de Andrade, 2001).



Deve ainda considerar-se que ocorrem no ânodo reacções secundárias responsáveis pela formação de produtos de corrosão. Estas reacções (4.5), (4.6), (4.7) e (4.8), dependem do pH junto à zona anódica e da presença de potencial electroquímico à superfície da armadura (Ahmad, 2003), (Costa, 1997).



Com a formação dos produtos de corrosão, verifica-se um acréscimo das tensões internas, resultado do aumento de volume destes produtos. Este processo leva facilmente a fendilhação, delaminação e ainda destacamento do betão das armaduras. A gravidade com que se vão manifestar depende de uma série de factores, já referido no Capítulo 3. Daqui resultam óxidos e hidróxidos de ferro que por sua vez originam um aumento de volume à superfície dos varões. Uma vez impedido pelo betão envolvente das armaduras, esta expansão dá origem a forças expansivas muito importantes que geram tracções no betão e podem produzir a sua fendilhação ou delaminação (Appleton *et al.*, 2004).

Na Figura 4.6, ilustram-se exemplos de fendilhamento devido ao acréscimo de volume das armaduras e consequente aumento das tensões internas no betão.

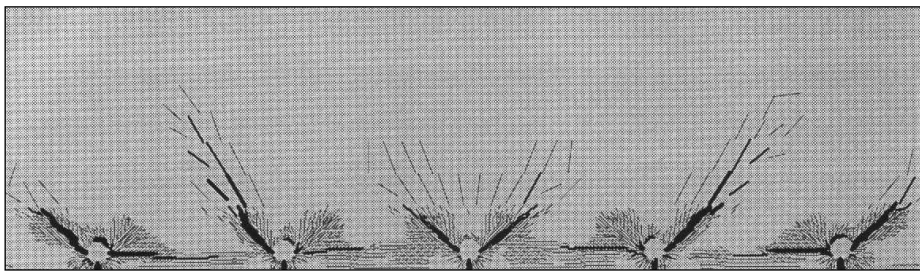


Figura 4.6 – Efeito do aumento de volume das armaduras no fendilhamento do betão (Appleton *et al.*, 2004).

Segundo Appleton *et al.* (2004), para além da fendilhação do betão, verifica-se também uma perda significativa de aderência aço/betão. Frequentemente, a corrosão ocorre essencialmente na zona mais exterior da armadura, podendo a zona interior funcionar como cátodo no processo de corrosão. Na zona onde ocorre a corrosão, os óxidos e hidróxidos de ferro vão,

numa situação avançada de corrosão, constituir uma película que tem fraca capacidade de resistência, reduzindo assim a aderência aço betão.

Na zona onde ocorre a corrosão, os óxidos e hidróxidos de ferro vão constituir uma película com fraca capacidade de resistência, reduzindo assim a aderência aço betão. Esta redução de aderência pode ser de primordial importância, uma vez que corresponde a uma perda percentual de resistência muito mais importante (50 a 100%) do que a correspondente perda de secção do aço (10 a 20%).

O mecanismo de corrosão em estruturas de betão armado envolve três etapas como evidenciado na Figura 4.7.

- i. Um período de iniciação que se define como o intervalo de tempo necessário para que diversos agentes agressores (Cl^- , CO_2) penetrem através do recobrimento do betão armado e cheguem às armaduras em quantidades suficientes para despassivar as armaduras;
- ii. Um período de propagação após o início da corrosão, verificando-se não muito depois do início, fendas e delaminação do betão de recobrimento;
- iii. Por último, um período de aceleração onde a armadura já exposta através de fendas e delaminação do betão, com acesso livre a oxigénio, água e outros agentes, se deteriora assistindo-se a perdas de secção dos varões.

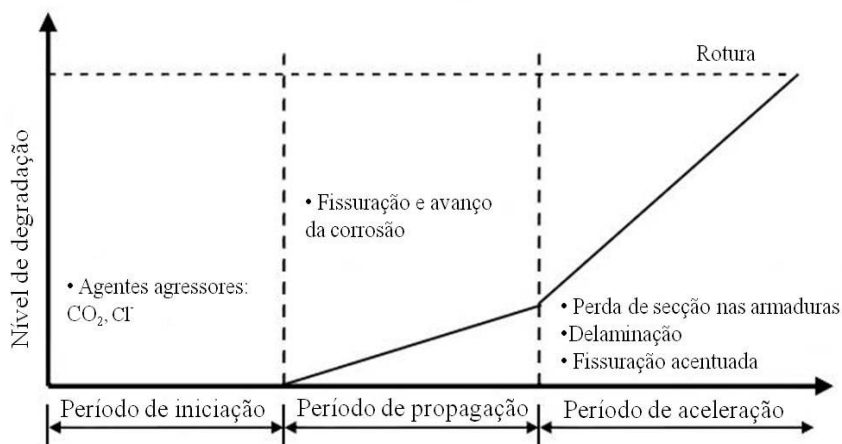


Figura 4.7 – Três fases no processo de corrosão de armaduras (Heckroodt, 2002).

No ambiente marítimo, é a duração do período de iniciação que, em geral, condiciona a vida útil das estruturas, dado que as velocidades de corrosão são em geral muito elevadas (Appleton e Costa, 1999a). Uma vez iniciada a corrosão, Costa (1997) refere que a velocidade com que o mecanismo se vai processar depende fundamentalmente do teor de humidade do betão. Este parâmetro controla directamente os dois factores que condicionam a evolução da corrosão: o acesso de oxigénio às armaduras e a resistividade do betão. Uma vez que a humidade do betão exerce um efeito contrário relativamente à acção que os dois factores já

referidos têm no processo da corrosão, existe um teor de humidade óptimo para o qual a velocidade de corrosão é máxima (90-95%).

4.4.1 Tipos de corrosão

Existem diversos tipos de corrosão de armaduras, com diferentes origens e morfologias para a estrutura. Podem verificar-se sintomas de corrosão por picadas, sob tensão ou corrosão generalizada das armaduras. Na Figura 4.8, apresenta-se um exemplo dos tipos de corrosão usuais numa estrutura de betão armado.

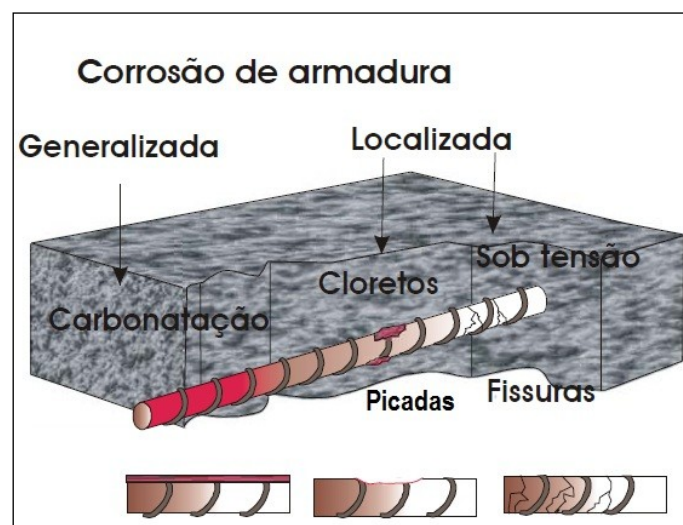


Figura 4.8 – Tipos de corrosão e factores que provocam (Polito, 2006 adaptado de Cascudo, 1997).

Por corrosão generalizada, entenda-se aquela que ocorre quando se verifica uma perda generalizada da película de passivação, resultante do avanço da frente de carbonatação, presença excessiva de cloretos junto às armaduras ou lixiviação do $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Este tipo de corrosão pode ocorrer de duas formas: uniformemente, com a superfície lisa e regular; ou não uniformemente, apresentando uma superfície rugosa e irregular. Neste tipo de corrosão, existe ainda o perigo de perda das características mecânicas do aço, no entanto, a consequência mais grave é o aumento do volume, provocado pelos produtos da corrosão, com consequente fissuração do betão e possível delaminação do mesmo. Castro *et al.* (2000) referem que a evolução da corrosão uniforme das armaduras, acelera a formação de fendas no betão e reduz desta forma a vida útil da estrutura.

A corrosão localizada é aquela que se forma por dissolução localizada da película de passivação, tipicamente causada pela penetração de iões cloretos vindos do exterior ou pertencentes a algum constituinte que compoñha o betão (água de amassadura ou areias/brita). Forma-se pontualmente uma célula de corrosão com uma área passiva intacta, actuando como

um cátodo, e uma pequena área que perdeu a sua película passiva actuando como ânodo, onde se reduz o oxigénio acabando por destruir o aço.

Pode-se ainda distinguir a corrosão sob tensão como aquela que ocorre em aços, submetidos a tensões não uniformes, cuja superfície gera uma micro fissura que vai progredindo rapidamente, acabando por provocar uma ruptura brusca e frágil da armadura. Ocorre normalmente em estruturas pré-esforçadas, mas pode-se dar também em estruturas de betão armado. Este tipo de corrosão caracteriza-se por roturas bruscas, sem deformação significativa de elementos estruturais e, praticamente sem sintomas visuais de corrosão, o que faz com que seja bastante perigosa para as estruturas.

Caso o ambiente esteja saturado (zonas submersas), deve ainda verificar-se o possível desenvolvimento de corrosão negra. Este tipo de corrosão surge normalmente em zonas onde o teor de humidade do betão é muito elevado, restringindo o acesso de oxigénio às zonas anódicas. Nestas condições, os produtos da corrosão formam-se sem grande aumento de volume, diluindo-se na solução dos poros do betão. Esta situação é muito gravosa dado que pode conduzir a elevadas perdas de secção das armaduras sem que ocorra delaminação do betão de recobrimento (Appleton *et al.*, 2000). Sugere-se então que se desenvolvam acções de inspecção (não destrutivas), mesmo que não existam sinais de deterioração visíveis, desenvolvendo operações de manutenção antes que os mecanismos de deterioração mais severos se desenvolvam na estrutura (EB-I, 2011).

De acordo com Jang e Oh (2009), assume-se geralmente de uma forma simplificada que a corrosão ocorre de forma uniforme e desta forma que as pressões internas ao longo das armaduras são também uniformes. Contudo, uma vez que os cloretos penetram numa direcção vindo da zona marítima, a corrosão inicia-se na parte mais externa da armadura e desta forma as armaduras não corroem de uma forma uniforme. O autor verificou ainda que os cloretos se acumulam perto da armadura e não a atravessam, ou seja, o estado real de corrosão perto da armadura não é uniforme e inicia-se por picadas. Este fenómeno traduz-se em expansões não uniformes ao longo das armaduras. Verifica-se, geralmente, a alternância de trechos não alterados com trechos fortemente corroídos. Na Figura 4.9, apresenta-se uma ilustração dos dois tipos de corrosão e da perda de secção característica.

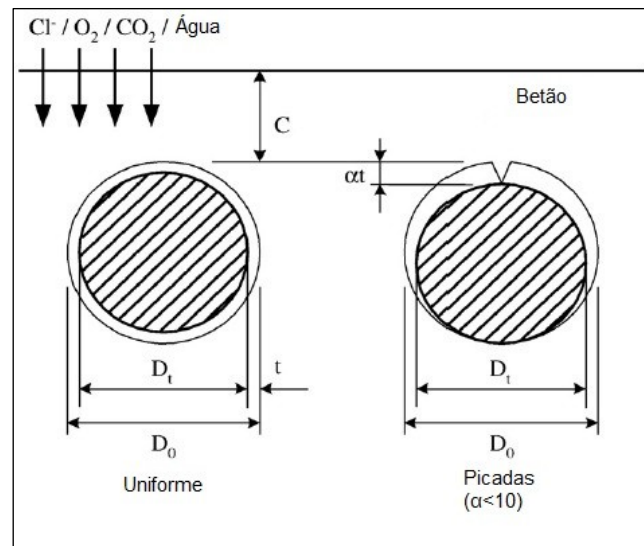


Figura 4.9 – Influência do tipo de corrosão na perda de seção das armaduras (Jang e Oh, 2010).

4.4.2 Corrosão das armaduras (ataque por cloretos)

A corrosão por penetração de cloretos no betão é usualmente considerada como o principal responsável pelo início do mecanismo de corrosão. Esse início dá-se quando o teor crítico de iões cloreto junto às armaduras é ultrapassado.

A proporção de cloretos livres no betão varia entre 20% a 50% da quantidade total de cloretos presentes. No entanto e para a corrosão ter início, é normalmente necessária uma concentração mínima de cloretos livres junto às armaduras. Apesar do valor ser ainda um pouco discutido, é usual considerarem-se valores acima de 0,4% da massa de cimento como valores críticos para o desenvolvimento da corrosão, por exemplo a especificação do LNEC E464. Na Figura 4.10, encontra-se um exemplo da evolução da concentração de cloretos no betão. Devido à preocupação com a possibilidade dos cloretos se manifestarem no betão como cloretos livres, a probabilidade de corrosão é normalmente expressa em termos do teor total de iões cloreto.

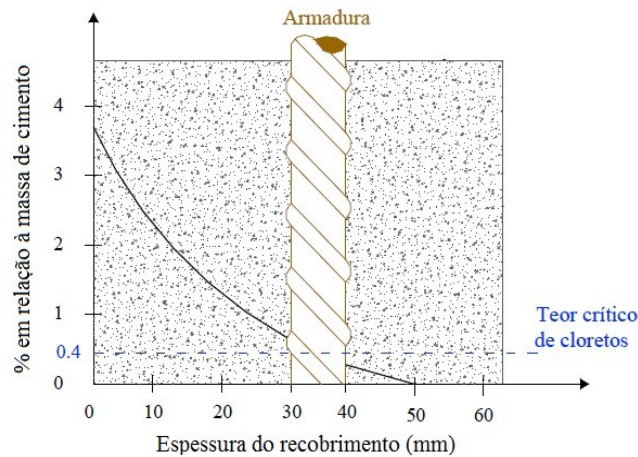


Figura 4.10 – Exemplo da evolução da % de cloretos ao longo do recobrimento de betão (Souza, 2005 citando Cascudo).

Os valores prescritos nas diferentes normas, para os limites críticos do teor em cloretos, são apresentados no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Valor do limite crítico em alguns países (Salta, 1996).

Limite crítico do teor em cloretos (% expressa em relação massa de cimento)

| Normas e recomendações | Tipo de betão | | |
|------------------------|---------------|--------------|---------------|
| | Em massa | Armado | Pré-esforçado |
| Espanhola EH88 | 1,5-2 | 0,4 | - |
| Portugal NP ENV206 | 1.0 | 0,4 | 0,2 |
| Inglesa BS-8110-1985 | - | 0,2-0,4* | 0,1 |
| Americana ACI-318-83 | - | 0,15-0,3-1** | 0,06 |
| Europeia CEB FIP-1985 | - | - | 0,1 |

*- varia em função do tipo de cimento

** - varia em função da agressividade do meio ambiente

Este ataque tem um efeito bastante gravoso na estrutura, porque uma vez iniciado o mecanismo de corrosão, desenvolve-se de uma forma muito veloz, quando comparado com o ataque por carbonatação (Costa, 1997). Appleton *et al.* (2004) afirmam que é usual considerarem-se velocidades de corrosão de 1 a 500 $\mu\text{m}/\text{ano}$ para a corrosão por cloretos, valores muito superiores aos considerados para o ataque por carbonatação (0,1 a 10 $\mu\text{m}/\text{ano}$).

Os cloretos podem ter duas origens (Mehta e Monteiro, 1994).

- interna: podem ser incorporados na mistura através da utilização de agregados contaminados como por exemplo a utilização de água imprópria (salina), areias de praia não tratadas ou pela utilização de adjuvantes contendo cloretos como o CaCl_2 (Cloreto de cálcio).

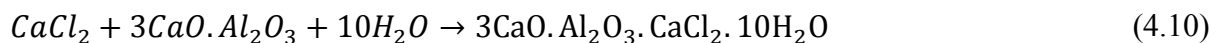
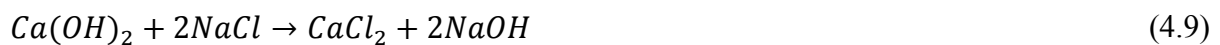
- externa: podem ainda penetrar no betão provenientes do exterior, por exemplo, através da água do mar.

Os cloretos podem igualmente ser encontrados sob 3 formas principais (Andrade, 2001 citando Figueiredo):

- quimicamente ligados, ou seja, combinados com o C_3A (aluminato tricálcico) e o C_4AF (ferro aluminato tetracálcico) contidos no cimento, formando cloroaluminatos;
- fisicamente absorvidos na superfície dos poros;
- livres, na solução dos poros.

O mecanismo de corrosão, neste caso, dá-se quando a concentração de cloretos junto as armaduras atinge o seu teor crítico. Nessa altura, ocorre a despassivação da película protectora e conseqüente ataque dos cloretos. A partir desse instante, os cloretos actuam como catalisadores junto à zona anódica reagindo com os iões ferro, formando cloreto de ferro e libertando electrões movimentados através da armadura até ao cátodo. Em seguida, o cloreto de ferro vai reagir com os iões hidróxidos presentes na solução, libertando cloretos e formando hidróxido de ferro. As duas conseqüências são: a diminuição da concentração de iões hidróxido, com conseqüente diminuição do pH e, por outro lado, a presença de iões cloreto livres junto ao ânodo (adaptado de Coito, 2008). Estão assim criadas as condições para o início da corrosão

Para Ben-Yair (1974), o processo de ataque por cloretos no betão dá-se quando o $MgCl_2$ após reagir com o $Ca(OH)_2$ do cimento hidratado vai formar $CaCl_2$ (cloreto de cálcio), que sendo solúvel acaba por ser lixiviado e levar a perdas de material. As reacções (4.9), (4.10), (4.11), (4.12) e (4.13) representam este processo:



4.4.3 Corrosão das armaduras (ataque por carbonatação)

A corrosão por carbonatação manifesta-se em geral com menor gravidade quando comparada com o ataque por cloretos, quer ao nível da velocidade com que se desenvolve, quer ao nível da agressividade para a estrutura (Coito, 2008).

Este mecanismo desenvolve-se através da penetração de CO_2 , por difusão, associado à presença de água nos poros do betão, e posterior reacção com o $Ca(OH)_2$ presente em quantidades elevadas na matriz do betão. A reacção (4.14) é a principal responsável pelo início deste tipo de mecanismo:



A reacção ocorre em três fases. Na primeira fase, o CO_2 difunde-se para o interior do betão. Na segunda fase, o CO_2 reage com as moléculas de água e numa terceira fase, o produto resultante, ácido carbónico, reage com os componentes alcalinos do betão reduzindo o pH do betão para valores próximos de 9.

A carbonatação penetra para além da camada superficial muito lentamente, à medida que a humidade libertada da reacção (4.11) se difunde para preservar o equilíbrio da humidade entre a atmosfera e o interior do betão (Ferreira, 2000). Na Figura 4.11, apresenta-se um modelo de difusão da carbonatação.

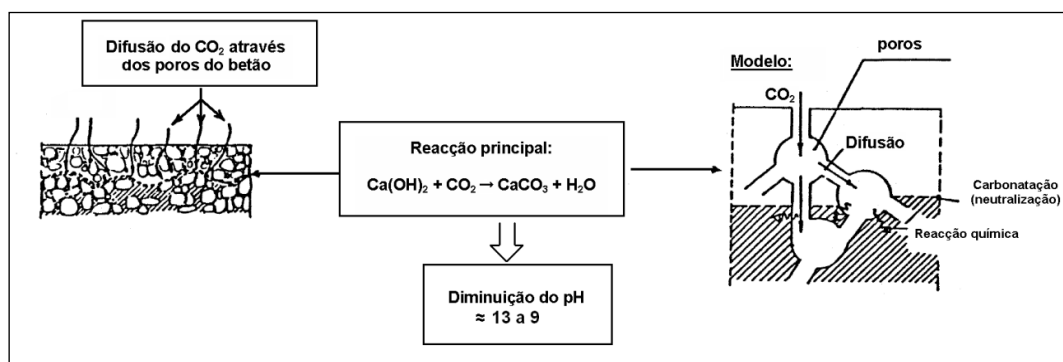


Figura 4.11 – Avanço do processo de carbonatação (Salta, 1996).

Apesar da carbonatação por si só não causar deterioração do betão, possui efeitos importantes. Um desses efeitos é a retracção por carbonatação, estando o efeito mais relevante relacionado com a reacção (4.11), uma vez que a redução do pH na solução dos poros do betão para valores próximos de 9, cria um ambiente instável para a película passiva que envolve as armaduras. No Quadro 4.2, apresenta-se um exemplo do efeito do pH no betão para a evolução da corrosão nas armaduras.

Quadro 4.2 – Estado de corrosão conforme o nível de pH no betão (Berkeley e Pathmanaban, 1990).

| <i>pH no betão</i> | <i>Corrosão das Armaduras</i> |
|--------------------|-----------------------------------|
| < 9,5 | Início da corrosão |
| = 8,0 | Eliminação da película passivante |
| < 7,0 | Corrosão acentuada |

As diferenças de concentração de CO_2 entre a atmosfera e o betão levam à disseminação do dióxido de carbono nos poros do betão e conseqüente ataque às armaduras (Salta, 2006). Relativamente ao ambiente marítimo, a carbonatação, apesar das concentrações de CO_2 não serem muito elevadas, apresenta um papel importante no que aos cloretos diz respeito, uma vez que, ao diminuir a capacidade de fixação e reacção dos cloretos com a pasta de cimento, aumenta a percentagem de cloretos livres (responsáveis pela corrosão das armaduras). Esta situação leva ao aumento da velocidade de penetração de cloretos para o interior do betão e conseqüente aumento da velocidade da corrosão.

Como ilustrado na Figura 4.12, podem identificar-se três zonas distintas no processo de carbonatação. A zona carbonatada onde existe $CaCO_3$, onde já houve consumo de iões hidróxido e por isso valores de pH inferiores a 9. Na zona não carbonatada ainda não ocorreu a penetração do CO_2 , valores de pH na ordem dos 13. Por fim, uma zona intermédia onde se dá a reacção de carbonatação indicada em reacção (4.14) e onde a alcalinidade do meio começa a reduzir.

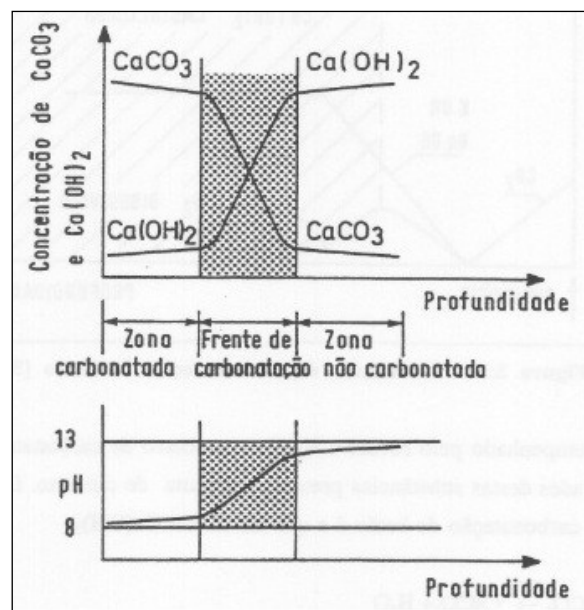


Figura 4.12 – Zonas envolvidas no mecanismo de carbonatação e variação do pH ao longo da profundidade (Costa, 1997).

A velocidade com que a carbonatação se desenvolve depende de uma série de factores, nomeadamente, o teor de humidade da estrutura e a humidade relativa nas imediações da estrutura (Appleton *et al.*, 2000). A carbonatação é também influenciada pela concentração de CO_2 no ar, composição do betão, e pela razão a/c do betão.

Vários autores consideram que a concentração de CO_2 exerce um papel importante no desenvolvimento da carbonatação. Para Neville (1982), apesar da concentração de CO_2 poder variar de meio para meio, sendo mínima em meio rural (0,03% em volume) e máxima em zonas de densa ocupação urbana/industrial (1% em volume), mesmo em concentrações pequenas se verifica a difusão do dióxido de carbono no betão.

Para Haque e Al-Khaiat (1996), segundo o estudo realizado no Kuwait sobre carbonatação conclui-se que, em estruturas localizadas na costa, a carbonatação ocorre mais rapidamente do que em estruturas localizadas mais no interior, devido às condições de humidade e temperatura mais favoráveis. De salientar ainda que a carbonatação é máxima para temperaturas de 20° a 25°C e HR de 40 a 70% (Odriozola, 2007). Salta (2006) considera que a velocidade de carbonatação é fortemente influenciada pela temperatura, nomeadamente na velocidade das reacções, na difusão do dióxido de carbono e no nível de saturação do betão.

4.5 Principais anomalias e catálogo dos níveis de degradação

As anomalias mais frequentes em construções de betão armado são as fissuras (com maior predominância), delaminações ou perdas de secção das armaduras ou DE elementos de betão (PRC, 2011).

Lança (2011) assume que o mecanismo de corrosão é um processo com fases bem distintas e que se manifestam sequencialmente ao longo do tempo. Por ordem crescente de importância, o autor destaca: manchas de óxido de ferro; fissuras de delaminação no betão, dispostas segundo o eixo das armaduras; delaminação do betão sem exposição das armaduras; delaminação do betão com exposição das armaduras, que se encontram na maioria dos casos corroídas, com eventual redução importante da sua secção.

Como mencionado, o primeiro sinal visível de corrosão das armaduras consiste no aparecimento de manchas de cor castanha ou avermelhada, provenientes das reacções do óxido de ferro (PRC, 2011). Nalguns casos, essas manchas são acompanhadas por fissuração, desagregação e delaminação do betão, por acção das forças internas geradas no processo corrosivo (Monteiro, 2010).

Na Figura 4.13, apresenta-se um exemplo da sequência dessas fases.









Figura 4.13 – Fases do mecanismo de corrosão (Adaptado de Lima e Pacha, <http://patologiaestrutura.vilabol.uol.com.br/>, consultado a 16 de Julho de 2011).




Para uma melhor análise e quantificação do estado de degradação das estruturas, foram elaborados catálogos dos níveis de degradação para as principais anomalias presentes neste tipo de ambientes: alteração cromática, fissuração, delaminação, perda de secção das armaduras. A escolha das anomalias baseou-se no mecanismo de corrosão uma vez que é este o que maior influência e significado tem na degradação destas estruturas.




Apresenta-se em seguida o catálogo dos níveis de degradação (separado por fichas I, II, III e IV) para cada uma das anomalias consideradas (alteração cromática, fissuração, delaminação e perda de secção). O catálogo tem o mesmo intuito dos sistemas informáticos Pontis e Bridgeit, isto é, auxiliar na inspeção de estruturas em serviço, nomeadamente na quantificação da extensão da anomalia encontrada.

Deve-se salientar que os níveis estabelecidos para as fichas do catálogo foram obtidos em função do universo da amostra que foi estudada e do estado geral das estruturas observadas e, por isso mesmo, não pretendem representar todas as escalas de níveis de degradação que possam ser encontrados noutras estruturas similares.

| ALTERAÇÃO CROMÁTICA | ESCALA | FICHA I |
|---|--|--|
| <p>DEFINIÇÃO</p> <p>A coloração superficial é uma característica do betão e pode dar indicações sobre as propriedades do betão e dos mecanismos de degradação que nele se desenvolvem.</p> | <p>Coloração em menos de 20% dos elementos</p> | <p>NÍVEL 1</p>  |
| <p>CAUSAS POSSÍVEIS</p> <p>A principal causa, e a que maior problemas pode provocar na estrutura é a corrosão das armaduras, devido ao ataque de cloretos e/ou à carbonatação.</p> | <p>Coloração entre 20% e 40% dos elementos</p> | <p>NÍVEL 2</p>  |
| <p>QUANTIFICAÇÃO</p> <p>Através da área afectada por coloração.</p> | <p>Coloração em mais de 40% dos elementos</p> | <p>NÍVEL 3</p>  |

| FISSURAÇÃO | ESCALA | FICHA II |
|---|--|--|
| <p>DEFINIÇÃO</p> <p>A fissuração é uma característica superficial do betão e caracteriza-se pela abertura de fissuras ao longo do elemento, estando a gravidade com que se manifestam normalmente associada à abertura e à densidade com que se manifestam.</p> | <p>Abertura da fissura inferior a 2 mm</p> | <p>NÍVEL 1</p>  |
| <p>CAUSAS POSSÍVEIS</p> <p>A fissuração é uma anomalia com diversas causas possíveis, no entanto, em ambiente marítimo/fluvial, a oxidação do processo de corrosão provoca o aumento de volume das armaduras gerando tensões no interior do betão, o que causa fissuração.</p> | <p>Abertura da fissura entre 2 <math>e</math> 5 mm</p> | <p>NÍVEL 2</p>  |
| <p>QUANTIFICAÇÃO</p> <p>Espessura da fissura medida de forma ordinária.</p> | <p>Abertura da fissura superior a 5 mm</p> | <p>NÍVEL 3</p>  |

| DELAMINAÇÃO DO BETÃO | ESCALA | FICHA III |
|---|---|--|
| <p>DEFINIÇÃO</p> <p>A delaminação caracteriza-se pela perda localizada do betão de recobrimento. Consiste na libertação dos agregados após a perda progressiva da união conferida pela pasta de cimento.</p> | <p>Delaminação inferior a 15% dos elementos.</p> | <p>NÍVEL 1</p>  |
| <p>CAUSAS POSSÍVEIS</p> <p>A oxidação provocada pelo ataque de cloretos leva à fissuração e posteriormente à delaminação do betão.</p> | <p>Delaminação entre 15% a 30% dos elementos.</p> | <p>NÍVEL 2</p>  |
| <p>QUANTIFICAÇÃO</p> <p>Extensão afectada pela anomalia.</p> | <p>Delaminação superior a 30% dos elementos</p> | <p>NÍVEL 3</p>  |

| PERDA DE SECÇÃO DAS ARMADURAS | ESCALA | FICHA IV |
|--|---|--|
| <p>DEFINIÇÃO</p> <p>A perda de secção das armaduras caracteriza-se por uma redução generalizada da secção útil da armadura, nomeadamente o diâmetro efectivo.</p> | <p>Perda de secção das armaduras inferior a 10% do diâmetro inicial.</p> | <p>NÍVEL 1</p>  |
| <p>CAUSAS POSSÍVEIS</p> <p>A principal causa é a corrosão das armaduras, variando a gravidade desta anomalia com o tipo de corrosão que se manifeste (uniforme, picadas, sob tensão).</p> | <p>Perda de secção das armaduras entre 10% e 40% do diâmetro inicial.</p> | <p>NÍVEL 2</p>  |
| <p>QUANTIFICAÇÃO</p> <p>Análise visual do aspecto geral das armaduras, com medição através de fita métrica do diâmetro.</p> | <p>Perda de secção das armaduras superior a 40% do diâmetro inicial.</p> | <p>NÍVEL 3</p>  |

5. METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO IN-SITU E LABORATORIAL

5.1 *Considerações iniciais*

A quinta parte da presente investigação tem como objectivo apresentar o desenvolvimento do estudo realizado. Através do estudo de estruturas de betão armado situadas em diferentes ambientes, pretende-se perceber qual a influência de cada um dos ambientes (fluvial e marítimo) na degradação das mesmas. Procurou-se analisar não só a influência dos factores referidos no Capítulo 3 na evolução da degradação, mas também descrever o estado geral das estruturas segundo os catálogos dos níveis de degradação definidos no Capítulo 4.

Têm-se como objectivo final descrever um padrão de degradação face ao tipo de factores observados nas diferentes estruturas.

Para cada análise, descreve-se a metodologia efectuada, as considerações tomadas e apresentam-se os resultados obtidos e a respectiva análise e interpretação.

No final faz-se uma síntese da investigação efectuada e dos principais resultados obtidos.

5.2 *Metodologia do estudo*

Em primeiro lugar são descritas as estruturas, distinguindo-as consoante o ambiente em que se encontram (fluvial ou marítimo).

Ao nível fluvial (AF), a zona de estudo foi a do estuário do rio Tejo, dado o elevado número de estruturas em betão armado na área e as condições que se verificam nesta zona. Relativamente às estruturas em ambiente marítimo (AM), foram considerados dois portos de pesca: Peniche e Nazaré, localizados cerca de 100 km a Norte de Lisboa e cujas condições de agressividade diferem das estruturas fluviais.



Figura 5.1 – Localização das estruturas consoante o ambiente em que se encontram (AF – ambiente fluvial ou AM - ambiente marítimo) (Google Earth, 2011 <http://earth.google.com/intl/pt/> visitado a 10 de Setembro de 2011).

De forma complementar ao apresentado, foi estudada a influência dos factores ambientais nas estruturas que serviram de base para o estudo. Para tal, recolheram-se dados do Instituto de Meteorologia referentes a parâmetros climatéricos, tais como temperatura, humidade relativa, vento, precipitação e insolação. O objectivo consistia em perceber, através do levantamento fotográfico feito, se existe influência deste tipo de factores na degradação das estruturas.

Foi também realizada uma recolha de amostras de água em todos os cais. Com esta recolha, pretendia-se obter informação sobre as percentagens de determinados iões agressivos nas águas envolventes às zonas em estudo.

Com a recolha de elementos fotográficos das estruturas a estudar, foi possível perceber e sugerir um padrão de degradação para as mesmas. Esta análise baseou-se nos catálogos dos níveis de degradação propostos no Capítulo 4, além de que se procurou reconhecer as principais causas de acordo com os factores referidos no Capítulo 3.

Recorreu-se também a ensaios não destrutivos *in situ* (recolha de amostra de pó para estudo de cloretos por meio de um berbequim e de elemento de recolha de pó), nas estruturas onde houve possibilidade (de acessos e permissão). Foram recolhidas amostras a 3 profundidades distintas (1, 3 e 5 cm) para averiguar a variação da penetração de cloretos nas estruturas.

5.3 Identificação das estruturas analisadas

No Quadro 5.1, apresenta-se um quadro resumo das localizações/coordenadas GPS de cada uma das estruturas estudadas.

Quadro 5.1 – Localização e identificação de cada uma das estruturas estudadas.

| <i>Nome Cais</i> | <i>Localidade</i> | <i>Nome da Estrutura</i> | <i>Latitude</i> | <i>Longitude</i> | <i>ID</i> |
|--|-----------------------------|--------------------------|-----------------|------------------|-----------|
| Cais do Ginjal (CA) | Cacilhas, Almada | PC CA 1 | 38°41'17'' N | 9°09'02'' O | ID 1 |
| | | PC CA 2 | 38°41'16'' N | 9°09'03'' O | ID 2 |
| | | PC CA 3 | 38°41'16'' N | 9°09'05'' O | ID 3 |
| | | PC CA 4 | 38°41'16'' N | 9°09'07'' O | ID 4 |
| Terminal Marítimo Porto Brandão (PB) | Porto Brandão, Almada | PC PB 1 | 38°40'38'' N | 9°12'41'' O | ID 5 |
| | | ES PB 2 | 38°40'39'' N | 9°12'39'' O | ID 6 |
| Cais da Matinha (MA) | Matinha, Lisboa | PC MA 1 | 38°45'00'' N | 9°05'41'' O | ID 7 |
| | | PC MA 2 | 38°44'60'' N | 9°05'38'' O | ID 8 |
| Cais Museu Electricidade (ME) | Belém, Lisboa | PC ME 1 | 38°41'44'' N | 9°11'37'' O | ID 9 |
| | | PC ME 2 | 38°41'43'' N | 9°11'44'' O | ID 10 |
| | | PC ME 3 | 38°41'42'' N | 9°11'48'' O | ID 11 |
| Cais da Ponte (PO) | Alcântara, Lisboa | PC PO | 38°41'53'' N | 9°10'46'' O | ID 12 |
| Porto de Peniche (PE) | Peniche | PCE PE 1 | 39°21'16'' N | 9°22'34'' O | ID 13 |
| | | PCE PE 2 | 39°21'16'' N | 9°22'32'' O | ID 14 |
| | | PCE PE 3 | 39°21'17'' N | 9°22'28'' O | ID 15 |
| | | PCD PE 4 | 39°21'20'' N | 9°22'07'' O | ID 16 |
| | | PCD PE 5 | 39°21'22'' N | 9°22'05'' O | ID 17 |
| | | PCE PE 6 | 39°21'18'' N | 9°22'00'' O | ID 18 |
| | | PCE PE 7 | 39°21'17'' N | 9°21'59'' O | ID 19 |
| Porto da Nazaré (NA) | Nazaré | CD NA 1 | 39°35'04'' N | 9°04'32'' O | ID 20 |
| | | PCE NA 2 | 39°35'01'' N | 9°04'28'' O | ID 21 |
| | | PCE NA 3 | 39°35'00'' N | 9°04'25'' O | ID 22 |

As siglas PC, PCE, PCD, ES e CD significam Ponte Cais, Ponte Cais Estacionamento, Ponte Cais Descarga, Estrutura de Suporte e Cais Descarga respectivamente.

5.2.1 Ambiente fluvial

Para o ambiente fluvial, estudou-se a degradação em cinco cais. Na Figura 5.2, apresenta-se uma imagem satélite da localização dos cais considerados.

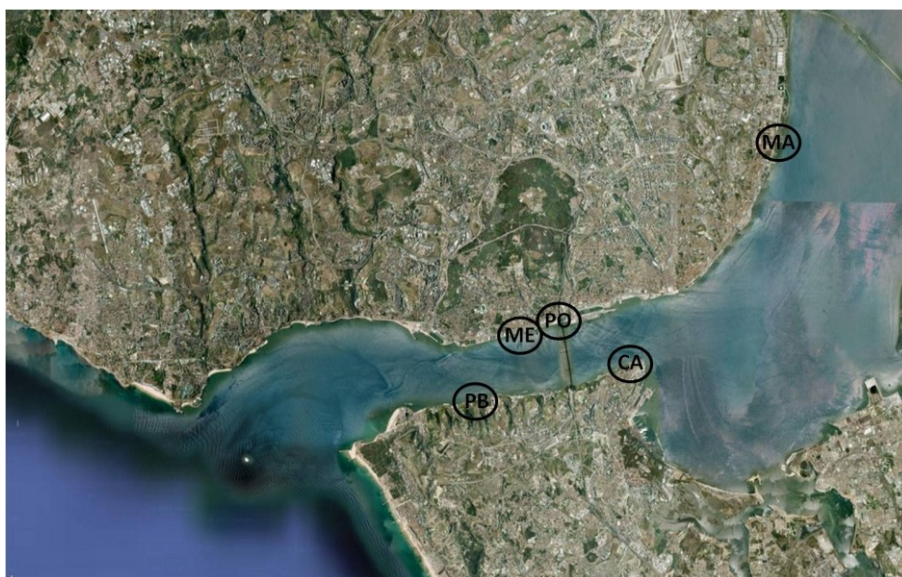


Figura 5.2 – Localização das estruturas analisadas em ambiente Fluvial (Google Earth, 2011 <http://earth.google.com/intl/pt/> visitado a 10 de Setembro de 2011).

Nas Figura 5.3, Figura 5.4, Figura 5.5, Figura 5.6 e Figura 5.7 apresentam-se imagens dos cais que serviram de base para este estudo, inseridos no ambiente fluvial.



Figura 5.3 – Cais Museu Electricidade (ME).

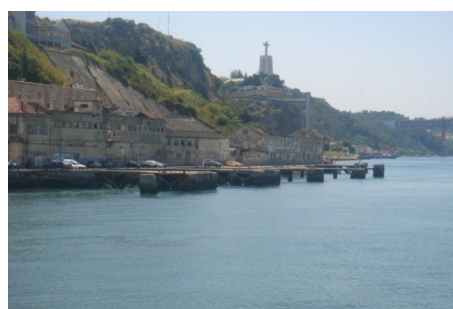


Figura 5.4 – Cais do Ginjal (CA).



Figura 5.5 – Cais da Matinha (MA).



Figura 5.6 – Terminal Porto Brandão (PB).



Figura 5.7 – Cais da Ponte (PO).

5.2.2 Ambiente marítimo

Em relação ao ambiente marítimo, como referido, estudou-se a degradação de dois cais, mais propriamente dois portos de pesca. Na Figura 5.8, apresenta-se a localização geográfica dos portos a estudar (Peniche e Nazaré).



Figura 5.8 – Localização das estruturas analisadas em ambiente marítimo (Google Earth, 2011 <http://earth.google.com/intl/pt/> visitado a 10 de Setembro de 2011).

Nas Figura 5.9 e Figura 5.10 apresentam-se imagens dos portos analisados neste ambiente.

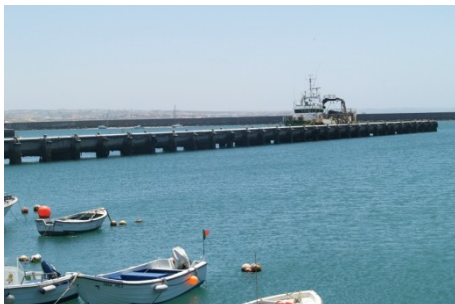


Figura 5.9 – Porto de Peniche (PE).



Figura 5.10 – Porto da Nazaré (NA).

5.4 *Dados climatéricos*

Como referido no Capítulo 3, optou-se por analisar a influência dos factores ambientais no processo de degradação das estruturas.

Em primeiro lugar, definiram-se os parâmetros a considerar na análise, relativamente ao clima em cada uma das estruturas. Assumiram-se como parâmetros essenciais na definição do ambiente:

- temperatura do ar;
- humidade Relativa;
- vento;
- insolação;
- precipitação.

Após contacto com o Instituto de Meteorologia, consultaram-se os valores dos parâmetros referidos para cada uma das estruturas estudadas a partir dos dados recolhidos em estações climatológicas perto das zonas onde se localizam as estruturas do estudo.

A recolha dos dados foi feita por consulta das Normais Climatológicas (41-70 e 51-80) disponibilizadas pelo Instituto. O facto de se tratar de períodos com cerca de três décadas de duração oferece uma maior fiabilidade aos dados recolhidos.

Face às estações climatéricas disponíveis nas zonas dos cais em estudo, analisou-se o posicionamento das estações em causa (através das suas coordenadas geográficas), distância à zona de estudo, altura do posto de recolha e presença de zonas montanhosas que possam influenciar os valores recolhidos, tentando obter sempre uma aproximação mais íntegra das condições de exposição das estações às estruturas.

Para as estruturas em ambiente fluvial, situadas no estuário do Tejo, e uma vez que foram estudadas estruturas com posicionamentos diferentes, foram recolhidos dados em três estações perto da zona onde se situa esta estrutura (Lisboa - Tapada Ajuda, Cabo Ruivo e Sacavém). A escolha destas três estações deveu-se à proximidade face ao mar e à altura a que o posto de recolha está situado relativamente ao nível do mar (próximo deste). Os dados foram analisados e foi feita a média para cada parâmetro entre as três estações.

Para as estruturas em ambiente marítimo, Peniche e Nazaré, verificou-se a existência de uma estação situada no Cabo Carvoeiro (Peniche) e a inexistência de estação climatérica perto da zona da Nazaré. Contudo, Castanho *et al.* (1997) durante o estudo de obras portuárias na enseada da Nazaré afirmam que o conhecimento dos regimes já analisados para outros pontos ao longo da costa oeste de Portugal Continental mostra que existe uma certa constância de valores ao longo da costa, entre eles para os ventos. Desta forma, assumiu-se que, apesar de ainda distante, os dados recolhidos na estação do Cabo Carvoeiro seriam representativos de ambas as estruturas (Peniche e Nazaré).

Para uma melhor percepção dos valores, é importante explicar os parâmetros analisados (INMG, 1991):

Temperatura do ar – Os valores contidos nos quadros são a média dos valores da temperatura do ar no local de observação, expressos em grau Celsius (°C).

Humidade relativa – Os valores da humidade relativa do ar estão expressos em percentagem (%), correspondendo 0 (zero) ao ar seco e 100 ao ar saturado de vapor de água.

Vento – A direcção e sentido do vento referem-se a oito rumos. Os quadros contêm o número médio de vezes, no mês e no ano, em que se observou cada um dos rumos ou calma expresso em centésimos (%), e o valor médio da velocidade para cada rumo, nas observações directas do dia. Contêm também, o valor médio da velocidade do vento (km/h). Por calma (C) entende-se as observações da velocidade do vento inferiores a 1,0 km/h.

Insolação – Os valores da insolação (tempo de sol descoberto) estão expressos em horas (h). A percentagem é o quociente, expresso em centésimos (%), da insolação observada pela insolação máxima possível no mês ou no ano.

Precipitação – Os valores da precipitação (altura da água no estado líquido, proveniente de hidrometeoros e recolhida num recipiente cilíndrico de boca horizontal) estão expressos em milímetros (mm).

No Quadro 5.2, apresentam-se os valores médios dos parâmetros considerados para a caracterização das condições climatéricas no Estuário do Tejo.

Quadro 5.2 – Dados climatéricos referentes à zona do Estuário do Tejo.

| Estuário do Tejo | | | | | | | | | | |
|------------------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|---------------|---------------|-------------------|-----------------------|-----|--------------|
| Temperatura média (°C) | | Humidade relativa (%) | | | Insolação (h) | | Precipitação (mm) | Vento | | |
| Mensal | | 9h | 15h | 18h | Total | % | Total | Direcção predominante | | |
| | 10,9 | 87 | 74 | 83 | 121,1 | 40,3 | 112,5 | N | JAN | |
| | 12,0 | 83 | 69 | 79 | 146,8 | 52,0 | 104,6 | NW | FEV | |
| | 13,1 | 80 | 64 | 76 | 183,4 | 50,0 | 84,3 | NW | MAR | |
| | 15,0 | 76 | 59 | 74 | 232,7 | 59,7 | 51,3 | NW | ABR | |
| | 17,0 | 74 | 55 | 71 | 293,9 | 66,7 | 42,3 | NW | MAI | |
| | 20,0 | 72 | 54 | 70 | 304,2 | 69,3 | 20,2 | NW | JUN | |
| | 22,3 | 71 | 50 | 67 | 342,7 | 78,7 | 3,5 | NW | JUL | |
| | 22,6 | 73 | 48 | 67 | 330,4 | 80,0 | 8,2 | NW | AGO | |
| | 21,2 | 78 | 55 | 72 | 249,7 | 68,3 | 23,7 | NW | SET | |
| | 18,1 | 81 | 61 | 76 | 199,9 | 58,3 | 73,5 | NW | OUT | |
| | 13,9 | 83 | 68 | 80 | 154,7 | 51,7 | 83,2 | NW | NOV | |
| | 11,3 | 85 | 73 | 81 | 132,1 | 45,3 | 101,1 | N | DEZ | |
| Máx | 16,5 | Mín | 78,5 | 60,6 | 74,5 | 224,3 | 60,0 | 59,0 | - | Média |
| 22,6 | - | 10,9 | | 71,2 | | 2691,6 | - | 708,5 | - | Ano |

Para o estudo das estruturas em ambiente marítimo, a informação recolhida (Quadro 5.3) é proveniente de dados da estação do Cabo Carvoeiro.

Quadro 5.3 – Dados climatéricos para o Cabo Carvoeiro.

Cabo Carvoeiro (Peniche e Nazaré)

| Temperatura média (°C) | | Humidade relativa (%) | | | Insolação (h) | | Precipitação (mm) | Vento | | |
|------------------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|---------------|---------------|-------------------|-----------------------|-----|--------------|
| Mensal | | 9h | 15h | 18h | Total | % | Total | Direcção predominante | | |
| 11,7 | | 84 | 79 | 82 | 127,7 | 43 | 88,6 | S | JAN | |
| 11,8 | | 84 | 78 | 81 | 140,6 | 47 | 80,4 | S | FEV | |
| 12,9 | | 83 | 76 | 81 | 171,4 | 47 | 68,6 | N | MAR | |
| 13,7 | | 85 | 77 | 82 | 212,3 | 54 | 46,9 | N | ABR | |
| 15,2 | | 87 | 80 | 83 | 245,7 | 56 | 37,6 | N | MAI | |
| 16,8 | | 90 | 82 | 84 | 244,3 | 55 | 16,9 | N | JUN | |
| 18,0 | | 92 | 83 | 86 | 267,0 | 60 | 2,2 | N | JUL | |
| 18,3 | | 93 | 84 | 86 | 269,6 | 64 | 6,6 | N | AGO | |
| 18,2 | | 90 | 84 | 87 | 211,2 | 57 | 22,7 | N | SET | |
| 16,8 | | 87 | 79 | 85 | 186,6 | 55 | 60,4 | N | OUT | |
| 14,1 | | 83 | 76 | 81 | 146,8 | 50 | 78,6 | N | NOV | |
| 12,1 | | 82 | 77 | 81 | 134,9 | 47 | 81,7 | N | DEZ | |
| Máx | 15,0 | Mín | 79,9 | 79,6 | 83,3 | 196,5 | 52,9 | 49,3 | - | Média |
| 18,3 | - | 11,7 | | 80,9 | | 2358,1 | - | 591,2 | - | Ano |

De acordo com a grandeza dos parâmetros considerados, atribuíram-se sinais de (+) e (++) para quantificar a influência que esses têm nas zonas analisadas (Quadro 5.4).

Quadro 5.4 – Influência dos parâmetros consoante a zona de estudo.

| Influência dos parâmetros | | | | | |
|---------------------------|-----------------------|---------------|-------------------|-------|------------------|
| Temperatura média (°C) | Humidade Relativa (%) | Insolação (h) | Precipitação (mm) | Vento | |
| + | + | ++ | ++ | + | Estuário do Tejo |
| + | ++ | + | + | ++ | Cabo Carvoeiro |

A observação dos Quadros 5.2 e 5.3 permite perceber a diferença entre os ambientes em causa. Relativamente ao estuário do Tejo destacam-se os valores da Insolação (em média cerca de 7h30min por dia), da temperatura média do ar (16,5 °C) e da humidade relativa (70%). Para a estação do Cabo Carvoeiro salientam-se os valores médios de temperatura do ar (15 °C), de humidade relativa (81%) e de insolação (em média 6h30 min por dia).

Comparando os valores observados, podem-se retirar quatro conclusões principais:

- temperatura do ar média superior no estuário do Tejo;
- humidade relativa do ar significativamente superior na estação do Cabo Carvoeiro (81% para os 71% do estuário do Tejo);
- tempo de insolação maior no estuário do Tejo (em média cerca de 1h por dia a mais do que na estação do Cabo Carvoeiro);
- precipitação mais frequente e em maiores quantidades na zona do estuário do Tejo.

Nos anexos II.1 a II.5, apresentam-se os valores climatéricos para cada uma das estações analisadas.

Relativamente ao vento, nos Quadro 5.2 e Quadro 5.3 apresentam-se os rumos predominantes para cada mês durante um período de 30 anos, para a zona do estuário do Tejo e para o Cabo Carvoeiro. Observa-se uma predominância de ventos NW no estuário do Tejo e de ventos N ao longo da costa oeste, nomeadamente no Cabo Carvoeiro.

Em relação ao rumo N para o Cabo Carvoeiro, já era de esperar um resultado destes, dadas as frequentes nortadas observadas na costa oeste Portuguesa. Esta informação é confirmada por Castanho *et al.* (1977), no qual os autores afirmam que para a zona da Nazaré, os ventos de N são os de maior frequência anual e sopram principalmente nos meses de verão, atingindo em Julho uma frequência da ordem de 60%. As conhecidas nortadas sopram quase continuamente nos meses de verão ao longo da costa ocidental de Portugal Continental. Nos anexos II.1 a II.5, são apresentados quadros com os valores de frequência e de velocidade média para cada uma das zonas referidas.

Uma análise do efeito dos factores ambientais na degradação das estruturas será abordada mais a frente neste capítulo.

5.5 Análise de amostras de água em diferentes ambientes

Tal como referido no Capítulo 3, a água do mar e os respectivos constituintes químicos um dos principais responsáveis pela agressividade que o meio marítimo/fluvial tem nas estruturas de betão armado.

Desta forma, foi pertinente uma análise às amostras de água recolhidas nos portos estudados, de forma a perceber as diferenças nas composições das águas onde se encontram as estruturas. Foram retiradas amostras de 1,5 l de água em determinados locais estudados para posterior análise em laboratório.

Segundo Coutinho (1998), os sais mais importantes presentes na água do mar são: o cloreto de sódio (NaCl), o cloreto de magnésio (MgCl₂), o sulfato de magnésio (MgSO₄), o sulfato de

cálcio (CaSO_4), o cloreto de potássio (KCl) e o sulfato de potássio (K_2SO_4), sendo em geral a concentração total de 35 g/l. Odriozola e Gutiérrez (2007) e Costa (1997) afirmam que as águas do mar apresentam, na sua maioria, uma composição química uniforme caracterizada pela presença de 3,5% (35g/l) de sais solúveis em massa. No Quadro 5.5, apresenta-se um exemplo dos principais iões presentes no Oceano Atlântico.

Quadro 5.5 – Principais iões no Oceano Atlântico (DIN 4030, 1991).

| <i>Iões</i> | <i>Quantidade de iões (mg/l)</i> |
|------------------|----------------------------------|
| SO_4^- | 2800 |
| Mg^{++} | 1300 |
| Ca^{++} | 400 |
| Cl^- | 19.900 |
| Na^+ | 11.000 |
| K^+ | 400 |
| pH | >8 |

Relativamente à composição da água em ambiente fluvial, os estudos realizados são menos frequentes. Appleton e Costa (1999b) estudaram os principais constituintes presentes na água para o estuário do rio Sado ao longo de um ano. No Quadro 5.6, apresentam-se esses valores.

Quadro 5.6 – Principais concentrações de iões em ambiente Fluvial (Appleton e Costa, 1999b).

| <i>Iões</i> | <i>Quantidade de iões (mg/l)</i> |
|------------------|----------------------------------|
| SO_4^- | 2100 - 2900 |
| Mg^{++} | 1000 - 1600 |
| Cl^- | 16000 - 21000 |
| pH | 7,8 - 8 |

Romano (2009), citando Matsuura, refere que apenas cinco elementos e um composto correspondem a 93,5% dos sais dissolvidos (Cl^- , SO_4 , Na^+ , K^+ , Mg^{++} , Ca^{++}).

Optou-se por analisar os iões mais influentes na degradação deste tipo de estruturas, e aqueles que em maior abundância aparecem na água. Analisaram-se então as concentrações de: iões cloreto (Cl^-), iões sulfato (SO_4^{2-}), iões magnésio (Mg^{2+}) e iões sódio (Na^+). Inseriu-se ainda o parâmetro pH, uma vez que o pH da água tem também influência na forma como o processo de degradação se vai desenvolver.

5.5.1 Análise e discussão dos resultados

A análise às concentrações e ao parâmetro referido foi feita segundo métodos internacionais definidos para a análise de águas a saber:

- para o parâmetro pH, foi utilizado o método SMEWW 4500 H+. Uma descrição deste procedimento pode ser encontrada no anexo I.1. Para os iões cloreto e sulfato foi utilizado o método SMEWW 4110 B relativo à cromatografia iónica. Uma descrição do procedimento deste método encontra-se no anexo I.2. Os iões sódio e magnésio foram obtidos a partir do método EPA 300.7. Uma descrição do método encontra-se no anexo I.3.

No Quadro 5.7, apresentam-se os resultados obtidos para as amostras retiradas nas áreas envolventes aos cais considerados.

Quadro 5.7 – Resultados das análises efectuadas às águas retiradas.

| <i>Locais/Parâmetros</i> | <i>Temperatura (°C)</i> | <i>pH</i> | <i>Cloreto (g/l)</i> | <i>Sulfato (g/l)</i> | <i>Magnésio (g/l)</i> | <i>Sódio (g/l)</i> |
|--------------------------|-------------------------|-----------|----------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|
| Museu Electricidade (ME) | 21 | 7,83 | 14 | 2,0 | 0,95 | 7,8 |
| Cacilhas (CA) | 21 | 8,07 | 18 | 2,6 | 1,2 | 10,1 |
| Porto Brandão (PB) | 20 | 7,89 | 14 | 2,1 | 0,99 | 8,1 |
| Matinha (MA) | 21 | 7,99 | 18 | 2,6 | 1,2 | 9,9 |
| Peniche (PE) | 21 | 8,05 | 20 | 2,8 | 1,3 | 10,9 |

Para uma melhor percepção dos resultados, os dados foram dispostos em forma barras, como expresso na Figura 5.11.

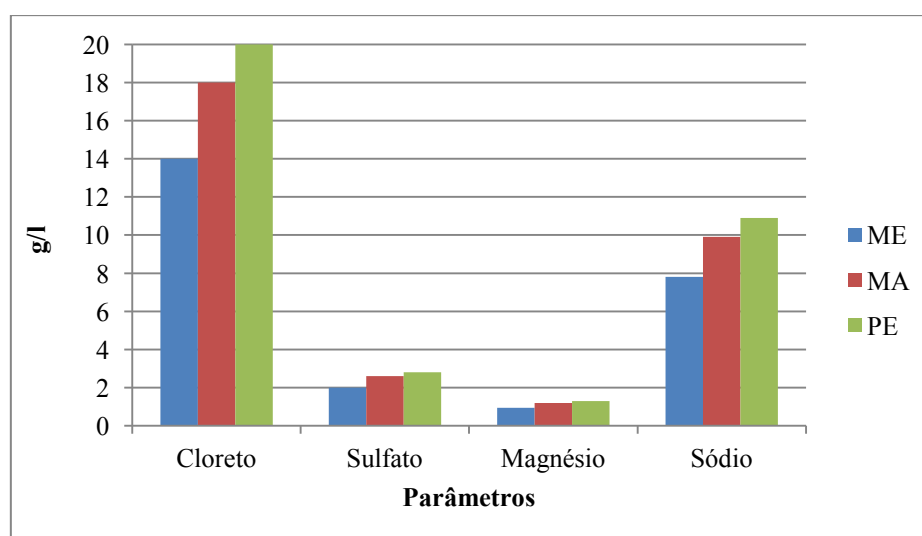


Figura 5.11– Dados referentes às análises de águas das amostras recolhidas em determinados cais.

Em primeiro lugar, deve-se referir que não foram analisados os parâmetros pH e temperatura, uma vez que estes apresentam valores muito semelhantes, como se verifica pelo Quadro 5.7.

Da análise do Quadro 5.7 e Figura 5.11 pode salientar-se:

- os valores obtidos tanto para as amostras fluviais como para a amostra marítima encontram-se próximos dos valores acima apresentados tomados como referência pela bibliografia consultada. No entanto, essa aproximação é mais evidente para a amostra marítima recolhida (Peniche). Esta situação vem comprovar a uniformidade das composições químicas das águas marítimas, referenciada por Odriozola e Gutierrez (2007), e Costa (1997);
- a amostra da zona marítima (Peniche – PE) apresenta uma concentração mais elevada em todos os dados analisados quando comparada com os valores das restantes amostras fluviais;
- analisando apenas os valores das amostras fluviais, podem-se destacar os valores semelhantes entre as amostras MA e de CA, e as amostras PB e ME. Deve ainda referir-se que as primeiras (MA e CA) apresentam valores superiores aos das outras amostras fluviais (PB e ME). Apesar de as amostras terem sido recolhidas em zonas muito próximas (Figura 5.2), o facto de terem sido recolhidas em datas diferentes (cerca de 2 meses de diferença) parece ter influenciado os resultados, devido à alteração do caudal e das características deste. As amostras de ME e PB foram recolhidas em Abril e as de MA e CA em Junho.

5.6 *Análise visual da degradação de estruturas em betão armado*

Neste subcapítulo, é analisada a degradação das estruturas apresentadas anteriormente, com base no catálogo dos níveis de degradação que subdivide as diversas fases do mecanismo de corrosão, em fichas de degradação. Este catálogo, apresentado no Capítulo 4, está relacionado com a evolução da corrosão das armaduras nas estruturas de betão armado, uma vez que esta é o mecanismo com maior impacte na degradação das estruturas em ambientes marítimos/fluviais.

As estruturas/elementos são analisados relativamente à degradação que apresentam, abordando-se os principais factores responsáveis por essa degradação. Em seguida são classificadas visualmente, em relação ao tipo de anomalia (n.º da ficha do catálogo), e posteriormente atribuída a gravidade com que se manifesta no elemento estudado (1, 2 ou 3).

A informação é agrupada num quadro para uma melhor percepção dos níveis de degradação e das diferenças verificadas.

A análise de degradação visual terá como principal objectivo perceber, de forma qualitativa, a influência dos factores descritos anteriormente na evolução de mecanismos de degradação através dos elementos fotográficos recolhidos. De uma forma quantitativa, foram também realizadas medições de recobrimentos e optou-se, com auxílio de uma bússola, por determinar a orientação do norte geográfico para cada uma das estruturas.

Deve-se salientar que, em grande parte das estruturas estudadas, a inexistência de registos oficiais que caracterizam os elementos estruturais, nomeadamente, datas de construção e o tipo de composição do betão utilizado, obrigou a que se procurassem outras fontes fidedignas que ilustrassem essas características. Neste campo, para se obter uma informação mais segura e próxima da realidade, recorreu-se aos Arquivos Fotográfico e Intermédio da Câmara Municipal de Lisboa, da Fundação EDP, Porto de Lisboa e IPTM, entre outros.

Pode-se referir sumariamente que, em praticamente todas as estruturas analisadas, se verificam diferenças de agressividade consoante as zonas de exposição (ZS, ZM, ZR, ZA).

5.6.1 Cais da Matinha (MA)

O cais dispõe de duas estruturas. A primeira data da década 40 e a segunda da década 70 (ver anexo III). Na Figura 5.12, apresenta-se uma planta via satélite do cais, com a direcção do Norte geográfico.

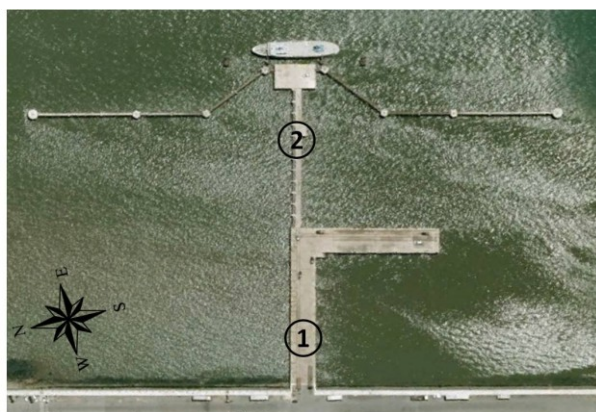


Figura 5.12 – Planta satélite do Cais da Matinha (Google Earth, 2011 <http://earth.google.com/intl/pt/> visitado a 10 de Setembro de 2011).

A delaminação e exposição das armaduras permitiram que fossem efectuadas medições do recobrimento em ambas as estruturas. A variabilidade dos valores medidos (Máx. e Mín.)

permite concluir que não existiram muitos cuidados no posicionamento e respeito do recobrimento definido em projecto.

As degradações mais evidentes ocorreram na zona atmosférica (ZA), onde existe pouco contacto com a água, sendo igualmente visíveis, nas Figura 5.13 e Figura 5.14, diferenças na degradação da estrutura consoante a exposição a que está sujeita.



Figura 5.13 – Imagem Nascente da PC MA 1 (arquivo pessoal).



Figura 5.14 – Imagem Poente da PC MA 1 (arquivo pessoal).

A PC 2 manifesta sinais de degradação avançada do lado Poente e poucas evidências do lado nascente (Figura 5.15 e Figura 5.16). A análise deste cais demonstra ainda diferenças na degradação da parte superior da laje. A parte virada a Sul encontra-se maioritariamente com delaminação nível 3, sendo a parte Norte, pouco afectada por esta anomalia. As principais razões encontradas para este fenómeno são as diferenças de exposição verificadas. O facto de ser uma estrutura bem mais recente que a sua vizinha, não é traduzida pela degradação que aparenta, uma vez que grande parte da estrutura apresenta sinais de corrosão.



Figura 5.15 – Imagem Nascente da PC MA 2 (arquivo pessoal).



Figura 5.16 – Imagem Poente da PC MA 2 (arquivo pessoal).

De referir também que a ausência de cuidados ao nível arquitectónico da estrutura faz com que grande parte das arestas salientes se encontrem degradadas.

As diferenças de degradação encontradas podem ser explicadas da seguinte forma:

- a exposição solar a que as PC estão sujeitas é totalmente diferente, sendo muito superior a exposição solar do lado Sul e praticamente nula do lado Norte. Este facto é ainda mais evidente na zona do estuário do Tejo, onde a média diária de sol é de 7h30 min. As inspecções realizadas ao local, permitiram comprovar que depois das 10/11 h da manhã o lado Norte deixa de receber sol;
- a direcção dos ventos NW nesta zona, obtida dos dados climatéricos, poderia intensificar a degradação do lado Norte. No entanto, o facto de este praticamente não receber sol, parece condicionar o desenvolvimento de mecanismos de corrosão. Esta constatação vem de encontro ao referido por Salta (2006) sobre o efeito catalisador do vento nas estruturas mais abrigadas;
- no caso da PC 1, a presença de defensas do lado Sul indica que ali atracavam embarcações (actualmente não em vigor). Esta situação pode também condicionar a estrutura, sendo sempre um aspecto a ter em conta na durabilidade da mesma.

Por observação dos elementos fotográficos, pode definir-se (Quadro 5.8) o estado geral das PC com base no catálogo dos níveis de degradação:

Quadro 5.8 – Quantificação da degradação do cais da Matinha.

| Nome | Exposição | Recob. Médio (cm) | Zona de estudo | Ficha I - Cor | Ficha II - Fissura | Ficha III - Delaminação | Ficha IV - Perda secção |
|---------|-----------|-------------------|--------------------|---------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|
| PC MA 1 | Nascente | 4,0 | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 1 | 1 | 1 | 2 |
| | Poente | | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 2 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 3 | 2 | 2 | 3 |
| PC MA 2 | Nascente | 3,1 | Marés | - | - | - | - |
| | | | Rebentação | - | - | - | - |
| | | | Atmosférica | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Poente | | Marés | - | - | - | - |
| | | | Rebentação | - | - | - | - |
| | | | Atmosférica | 1 | 2 | 3 | 1 |

Legenda: Marés: ZM, Rebentação: ZR, Atmosférica: ZA

5.6.2 Cais do Museu da Electricidade (ME)

O cais dispõe de três estruturas, tendo sido construído no início da década 40 (anexo III). Na Figura 5.17, apresenta-se uma planta via satélite do cais, com a direcção do Norte geográfico.

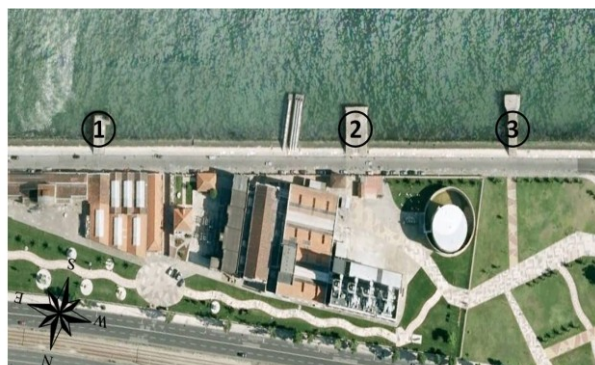


Figura 5.17 – Planta satélite do Cais do Museu da Electricidade (ME) (Google Earth, 2011 <http://earth.google.com/intl/pt/> visitado a 10 de Setembro de 2011).

O facto de ser uma estrutura já muito antiga obrigou a que se procurassem informações em arquivos fotográficos e de documentação. A recolha de dados do arquivo da Fundação EDP permitiu obter informação sobre as datas de construção e o recobrimento adoptado nas construções (5 cm) para todos os elementos. As medições realizadas *in situ* às três PC apresentam em média recobrimentos de 4 cm, com mínimos de 2 cm registados na parte inferior da laje.

Da observação dos elementos fotográficos para as três estruturas, percebe-se, que a degradação é novamente superior na ZA, principalmente no topo dos pilares e ligação com a laje. Verificam-se também degradações significativas nos pilares “interiores” e na parte inferior da laje (pertencentes à ZA). Por observação das Figura 5.18 e Figura 5.19, pode-se comprovar esta afirmação.



Figura 5.18 – Imagem Nascente da PC ME 2 no cais do Museu da Electricidade (Arquivo Pessoal).



Figura 5.19 – Imagem Nascente da PC ME 1 no Cais do Museu da Electricidade (Arquivo Pessoal).

Pode afirmar-se que de uma forma geral, as estruturas estão muito degradadas. No entanto, a PC Museu 3 apresenta-se em melhor estado.

Relativamente à influência da exposição solar e do vento nestas três PC, o nível de degradação no lado Nascente e Poente é bastante semelhante. Parece haver, no entanto, para as PC 1 e 2 um ligeiro acentuar na ZA para o lado Nascente. Esta ligeira diferença pode ser explicada pela corrente do rio Tejo, e o possível transporte de partículas sólidas na água. Por observação da orientação da estrutura através da Figura 5.17, é possível verificar que a insolação recebida do lado Nascente e Poente é muito próxima. Analisando a influência do vento, percebe-se que o facto de este predominar de N a NW, pouco peso tem para esta análise.

Podem então definir-se os níveis de degradação das estruturas como expresso no Quadro 5.9.

Quadro 5.9 – Quantificação da degradação do cais do Museu da Electricidade.

| <i>Nome</i> | <i>Exposição</i> | <i>Recob. Médio (cm)</i> | <i>Zona de estudo</i> | <i>Ficha I - Cor</i> | <i>Ficha II - Fissura</i> | <i>Ficha III - Delaminação</i> | <i>Ficha IV - Perda secção</i> |
|-------------|------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| PC ME 1 | Nascente | 4,1 | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 2 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | Poente | | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 2 | 1 | 2 |
| | | | Atmosférica | 3 | 3 | 3 | 3 |
| PC ME 2 | Nascente | 3,9 | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | Poente | | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 3 | 3 | 3 | 3 |
| PC ME 2 | Nascente | 3,8 | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 2 | 2 | 2 | 3 |
| | Poente | | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 2 | 2 | 2 | 3 |

Legenda: Marés: ZM, Rebentação: ZR, Atmosférica: ZA

5.6.3 Cais da Ponte (PO)

O cais consiste numa ponte cais, sendo inexistentes os registos sobre data de construção e outros aspectos construtivos em qualquer um dos arquivos consultados. Na Figura 5.20, apresenta-se uma planta via satélite do cais, com a direcção do Norte geográfico.

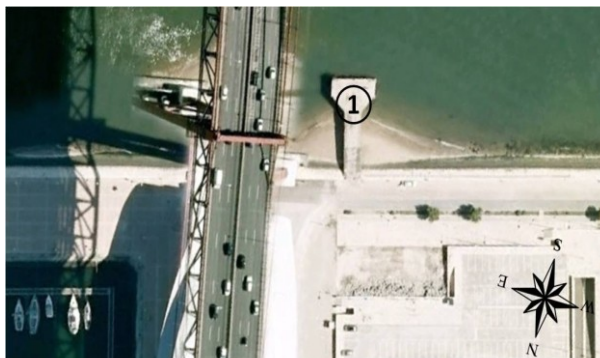


Figura 5.20 – Planta satélite do Cais da Ponte (PO) (Google Earth, 2011 <http://earth.google.com/intl/pt/> visitado a 10 de Setembro de 2011).

Da análise dos elementos fotográficos levantados, conclui-se novamente que a degradação é mais acentuada na ZA, nomeadamente no topo dos pilares, afectando de forma menos agressiva a estrutura. Por observação da Figura 5.21, pode-se comprovar esta afirmação.



Figura 5.21 – Imagem Nascente da PC PO no Cais da Ponte (arquivo pessoal).

A análise do nível de degradação da estrutura revela sinais de delaminação e perda de secção nível 3, principalmente nos pilares interiores do cais (Figura 5.22). Apesar da extensão das anomalias não ser tão acentuada, os vestígios encontrados demonstram que as zonas afectadas apresentam já um estado avançado de corrosão.



Figura 5.22 – Corrosão em pilar interior da PC PO (arquivo pessoal).

Da mesma forma que para o cais ME, através da orientação da estrutura percebe-se que tanto a insolação como o vento (N e NW) têm influências semelhantes em ambos os lados da estrutura (nascente e poente). Não é possível afirmar com certeza que existe uma clara influência destes factores na estrutura PO. Da análise do lado Poente da estrutura percebe-se que não existe de facto grande diferença nesta estrutura, sendo a extensão e a gravidade das anomalias semelhante.

Podem então definir-se os níveis de degradação das estruturas como expresso no Quadro 5.10.

Quadro 5.10 – Quantificação da degradação do cais da Ponte.

| Nome | Exposição | Recob. Médio (cm) | Zona de estudo | Ficha I - Cor | Ficha II - Fissura | Ficha III - Delaminação | Ficha IV - Perda secção |
|---------|-----------|-------------------|----------------|---------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|
| PC PO 1 | Nascente | 3,7 | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 2 | 2 | 2 | 3 |
| | Poente | | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 2 | 2 | 2 | 3 |

Legenda: Marés: ZM, Rebentação: ZR, Atmosférica: ZA

5.6.4 Cais do Ginjal (CA)

O cais do Ginjal data da década de 40 e dispõe de seis estruturas (ver anexo III). No entanto, para o trabalho foram apenas estudadas as quatro PC representadas na Figura 5.23. A análise deste cais foi feita de forma diferente devido à diferença na arquitectura das PC visível através da Figura 5.23. Comparou-se a degradação das PC 1 e 2, e posteriormente das PC 3 e 4.



Figura 5.23 – Planta satélite do cais do Ginjal (CA) (Google Earth, 2011 <http://earth.google.com/intl/pt/> visitado a 10 de Setembro de 2011).

Analogamente à avaliação feita para os cais anteriores, destaca-se novamente o nível de degradação mais elevado na ZA. Esta ideia é reforçada pela análise das Figura 5.24 e Figura 5.25.



Figura 5.24 – Representação da PC CA 1 (arquivo pessoal).



Figura 5.25 – Representação da PC CA 3 (arquivo pessoal).

Por observação das estruturas, percebe-se que, de uma forma geral, o nível de degradação é semelhante nas PC com arquiteturas idênticas. Verificam-se estados avançados de corrosão com anomalias nível 3, nomeadamente delaminações, alterações cromáticas e nalguns casos perdas de secção.

Pode ainda salientar-se a diferença na agressividade registada no topo dos pilares para as PC 1 e 3, Figura 5.26. Esta diferença deve-se à presença de uma ligeira consola na laje nas PC 3 e 4, situação com maior impacte na degradação desta zona. Esta alusão parece confirmar a influência dos aspectos arquitectónicos nas estruturas, referidos no Capítulo 3.



Figura 5.26 – Delaminação de nível 3 no topo dos pilares da PC CA 3, zona atmosférica (arquivo pessoal).

Relativamente à influência dos factores ambientais na evolução da degradação, o facto de estas se encontrarem já num estado avançado de degradação (estruturas com cerca de 70 anos de vida útil) dificulta um pouco esta análise.

Sendo o nível das anomalias usualmente encontradas máximo, a análise da influência deste tipo de factores é feita de acordo com a área afectada para o lado Nascente e Poente das estruturas. Para as PC 1 e 2, verifica-se que a área afectada do lado poente é superior, apresentando delaminações extensas na ZA, respectivamente no topo dos pilares e na laje. De forma análoga, as PC 3 e 4 apresentam igualmente uma área afectada com maior extensão nas

zonas viradas a Poente, tanto no topo dos pilares como nas arestas salientes da laje, que se apresentam delaminadas e totalmente corroídas. Na Figura 5.27, apresenta-se um exemplo disso.



Figura 5.27 – Delaminação do lado Poente da PC CA 2 (arquivo pessoal).

Por observação dos elementos fotográficos, define-se o estado geral das PC a partir do catálogo dos níveis de degradação (Quadro 5.11).

Quadro 5.11 – Quantificação da degradação do cais do Ginjal.

| <i>Nome</i> | <i>Exposição</i> | <i>Recob. Médio (cm)</i> | <i>Zona de estudo</i> | <i>Ficha I - Cor</i> | <i>Ficha II - Fissura</i> | <i>Ficha III - Delaminação</i> | <i>Ficha IV - Perda secção</i> |
|-------------|------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| PC CA 1 | Nascente | 3,9 | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 1 | 2 | 2 | 3 |
| | Poente | | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 1 | 3 | 2 | 3 |
| PC CA 2 | Nascente | 4,1 | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 1 | 2 | 2 | 3 |
| | Poente | | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 1 | 3 | 2 | 3 |
| PC CA 3 | Nascente | 3,8 | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 3 | 2 | 2 | 3 |
| | Poente | | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 2 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 3 | 2 | 3 | 3 |
| PC CA 4 | Nascente | 3,8 | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 3 | 2 | 2 | 3 |
| | Poente | | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 3 | 2 | 3 | 3 |

Legenda: Marés: ZM, Rebentação: ZR, Atmosférica: ZA

5.6.5 Terminal Marítimo de Porto Brandão

O Terminal Marítimo de Porto Brandão data da década 80 e dispõe de duas estruturas de suporte e uma ponte cais (ver anexo III). No entanto, a ausência de dados relativos aos materiais utilizados nas estruturas impede que se perceba com maior rigor a evolução da degradação. Na Figura 5.28, apresentam-se as estruturas analisadas neste trabalho.

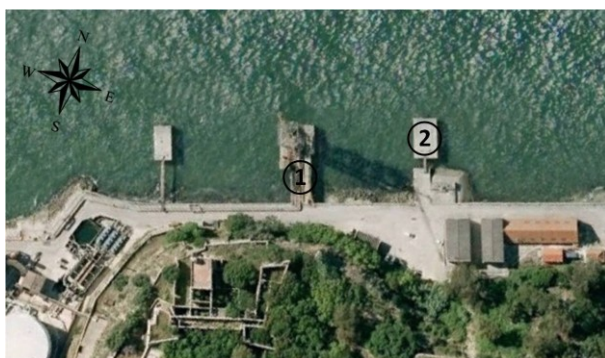


Figura 5.28 – Planta satélite do Terminal de Porto Brandão (PB) (Google Earth, 2011 <http://earth.google.com/intl/pt/> visitado a 10 de Setembro de 2011).

A PC PB 1 está apoiada em pilares construídos a partir de cofragem perdida, sendo no entanto possível verificar a degradação nas zonas de maré e de rebentação. Da mesma forma para a ES PB 2, a análise baseia-se na ZA. Na Figura 5.29, apresenta-se uma representação da estrutura.



Figura 5.29 – Representação da PC PB 1 Nascente (arquivo pessoal).

Da análise da Figura 5.29, verifica-se que a alteração cromática mais pronunciada se situa na ZA, com nível 2 na Figura 5.29 e nível 3 nas armaduras que se apresentam corroídas. Observam-se também poucos sintomas de delaminação nível 2 na ZR, sendo mais frequente o nível 3 na ZA. De referir que, na ZA, a delaminação manifestou-se principalmente nas vigas da PC, verificando-se também delaminação na parte inferior da estrutura visível pela figura acima. Esta localização pode estar ligada à arquitectura da estrutura e à presença de uma zona que funcione como “consola”.

Relativamente à perda de secção, a análise realizada permite concluir que as armaduras encontram-se, na sua maioria, corroídas e totalmente expostas, estando a capacidade estrutural da PC comprometida. Na Figura 5.30, apresenta-se um exemplo do estado da corrosão na estrutura.



Figura 5.30 – Exemplo de corrosão e perda de secção de nível 3 no Terminal de PB (arquivo pessoal).

Relativamente à ES PB 2, apesar de ter sido construída cerca de 15 anos após a PC PB 1, apresenta já indícios de corrosão, nomeadamente por alteração cromática e delaminação de nível 2 nalgumas zonas, visíveis através da Figura 5.31.



Figura 5.31 – Imagem Poente da ES Porto Brandão (arquivo pessoal).

Da análise dos parâmetros climáticos na influência da degradação pode-se destacar a diferença nas anomalias registadas na PC. O lado Nascente apresenta-se muito mais degradado, sendo de considerar a influência não só da corrente do rio, como da direcção dos ventos que predomina na zona (NW e N), uma vez que a exposição solar a que ambos os lados estão sujeitos não varia significativamente em nº de horas.

Por observação dos elementos fotográficos, pode definir-se o estado geral das PC a partir do catálogo de degradação como expresso no Quadro 5.12.

Quadro 5.12 – Quantificação da degradação do Terminal de Porto Brandão.

| Nome | Exposição | Recob. Médio (cm) | Zona de estudo | Ficha I - Cor | Ficha II - Fissura | Ficha III - Delaminação | Ficha IV - Perda secção |
|---------|-----------|-------------------|--------------------|---------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|
| PC PB 1 | Nascente | 3,3 | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Poente | | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 2 | 1 | 1 | 1 |
| ES PB 1 | Nascente | - | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 3 | 2 | 3 | 3 |
| | Poente | | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 2 | 2 | 2 | 3 |

Legenda: Marés: ZM, Rebentação: ZR, Atmosférica: ZA

5.6.6 Porto de Peniche

O porto de Peniche encontra-se dividido em duas grandes áreas. A primeira é composta por três passadiços de estacionamento (1,2 e 3) data da década 80, sendo a segunda de 2005, composta por quatro PC (4,5,6 e 7). Foram analisadas sete estruturas, que se encontram representadas na Figura 5.32 (ver anexo III).



Figura 5.32 – Planta satélite do porto de Peniche (PE) (Google Earth, 2011 <http://earth.google.com/intl/pt/> visitado a 10 de Setembro de 2011).

A análise é dividida em duas áreas, sendo primeiro abordadas as estruturas 1,2 e 3 e posteriormente as quatro restantes.

As PCE 1,2 e 3 apresentam arquiteturas semelhantes e, dada a sua localização, têm a mesma exposição face ao vento e insolação.

Através das visitas realizadas ao local são visíveis maiores cuidados na construção destas estruturas, nomeadamente com a colocação de defensas e com cuidados relativos à arquitectura escolhida para o local (principalmente nas arestas salientes de pilares e lajes).

Da observação das estruturas pela Figura 5.33, pode identificar-se o lado Nascente da PC PE 3 como a zona mais degradada destas PC. O nível de degradação registado nesta PC e a frequência com que as anomalias se manifestam (praticamente todos os pilares), distingue-se da frequência verificada no lado poente e nas restantes PC. São visíveis delaminações de nível 2 e 3, principalmente de nível 2, associadas a perdas de secção e de alteração cromática de nível 3 em cerca de 40% dos pilares. Os níveis encontrados sugerem um estado de corrosão avançado, apesar de nalgumas zonas não se manifestarem sintomas de degradação. Esta localização (Nascente na PC 3) pode ser explicada pelas movimentações de barcos no porto. Durante cerca de três décadas, o porto dispunha apenas destas três PCE, sendo a movimentação dos barcos de maior porte era feito na zona mais próxima à PCE PE 3. Por outro lado, esta PCE seria a mais solicitada pelos barcos de maior porte, uma vez que, situando-se mais próxima do cais de descarga da lota, as manobras e trajecto necessários ao estacionamento das embarcações é mais acessível nesta PCE.



Figura 5.33 – Degradação na PCE PE do 3 lado Nascente (arquivo pessoal).

Verifica-se que todas as PCE apresentam sintomas de corrosão relativamente avançada em diversos locais (Quadro 5.13). De uma forma geral, tal como para as estruturas em ambiente fluvial, a degradação mais evidente ocorre na ZA, sendo possível visualizar, pela Figura 5.34, delaminações singulares na ZR em alguns pilares. É de facto nos pilares que a degradação é mais visível, estando tanto as vigas como a laje pouco degradadas ao nível visual. Este aspecto está relacionado com a funcionalidade dos elementos estruturais, estando, nestes casos (PC em ambientes costeiros), os pilares submetidos a grandes solicitações por parte dos barcos que ali atracam diariamente. Esta situação, aliada à movimentação de cargas, produz consequências graves na evolução da degradação nestas estruturas.



Figura 5.34 – Representação da PCE PE 3 (arquivo pessoal).

Quadro 5.13 – Quantificação da degradação do porto de Peniche.

| <i>Nome</i> | <i>Exposição</i> | <i>Recob. Médio (cm)</i> | <i>Zona de estudo</i> | <i>Ficha I - Cor</i> | <i>Ficha II - Fissura</i> | <i>Ficha III - Delaminação</i> | <i>Ficha IV - Perda secção</i> |
|-------------|------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| PCE PE 1 | Nascente | 3,8 | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 2 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 2 | 3 | 2 | 3 |
| | Poente | | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 2 | 1 | 2 |
| | | | Atmosférica | 1 | 3 | 2 | 2 |
| PCE PE 2 | Nascente | 4,1 | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 2 | 3 | 2 | 2 |
| | Poente | | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 2 | 3 | 2 | 2 |
| PCE PE 3 | Nascente | 3,9 | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 2 | 3 | 3 | 3 |
| | Poente | | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 2 | 3 | 2 | 2 |

Legenda: Marés: ZM, Rebentação: ZR, Atmosférica: ZA

Relativamente à zona mais recente (2005), as estruturas analisadas não apresentam degradações com gravidades de nível 2 ou 3. São visíveis singularidades por análise da Figura 5.35, nomeadamente delaminação de nível 1 e fissuras de nível 1. No entanto, a sua origem é desconhecida e a influência na durabilidade das estruturas é mínima. A análise da Figura 5.35 pode indiciar a formação de produtos de corrosão no interior do betão, com aumento de volume e conseqüente fissuração do betão.



Figura 5.35 – Degradação nível 1 (fissuração e alteração cromática) na PCE PE 7 (arquivo pessoal).

A análise da PCD PE 4 e 5 é mais delicada, por se tratar de uma zona de descarga de pescado (lota), onde a movimentação de barcos, pessoas e mercadorias é muito superior. Das visitas realizadas e do que foi possível ver, não se verificam degradações em nenhuma das zonas, nem em nenhum elemento em particular.

Por observação dos elementos fotográficos, pode definir-se o estado geral das PC a partir do catálogo de degradação como expresso no Quadro 5.14.

Quadro 5.14 – Quantificação da degradação do porto de Peniche.

| <i>Nome</i> | <i>Exposição</i> | <i>Recob. Médio (cm)</i> | <i>Zona de estudo</i> | <i>Ficha I - Cor</i> | <i>Ficha II - Fissura</i> | <i>Ficha III - Delaminação</i> | <i>Ficha IV - Perda secção</i> |
|-------------|------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| PCD PE 4 | Nascente | - | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 1 | 2 | 1 | 1 |
| | Poente | | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 1 | 2 | 1 | 1 |
| PCD PE 5 | Nascente | - | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Poente | | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 1 | 1 | 1 | 1 |
| PCE PE 6 | Nascente | - | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Poente | | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 1 | 1 | 1 | 1 |
| PCE PE 7 | Nascente | - | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | Poente | | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 1 | 1 | 1 | 1 |

Legenda: Marés: ZM, Rebentação: ZR, Atmosférica: ZA

5.6.7 Porto da Nazaré

O porto da Nazaré data da década 80 e apresenta três estruturas principais, um cais de descarga e duas pontes cais de estacionamento (anexo III). Na Figura 5.36, apresenta-se uma vista geral do porto e das estruturas nele analisadas.



Figura 5.36 – Planta satélite do porto da Nazaré (NA) (Google Earth, 2011 <http://earth.google.com/intl/pt/> visitado a 10 de Setembro de 2011).

Das visitas realizadas ao local foi possível perceber o estado geral das estruturas. As pontes cais de estacionamento, com cerca de 30 anos de vida útil, apresentam-se num estado razoável, apesar de nalgumas zonas apresentarem indícios de corrosão visíveis pela Figura 5.37. Pode-se destacar delaminação de nível 2 em alguns pilares, associada a perdas de secção nível 2. Existem igualmente pilares com perdas de secção mais acentuadas, de nível 3.

Relativamente à fissuração esta manifesta-se maioritariamente nos pilares e nas vigas, sempre na ZA. Tal como nas restantes estruturas analisadas, é na ZA onde as principais anomalias das PC aparecem. Da influência do vento e da insolação não foi possível retirar uma clara diferença da influência destes agentes, no entanto parece ficar novamente a ideia que o lado Nascente apresenta uma maior percentagem de zona afectada, principalmente por delaminação.



Figura 5.37 – Delaminação acentuada na PCE NA 1 Nascente (arquivo pessoal).

O cais de descarga é a estrutura mais solicitada do porto, sujeita a diversas solicitações por parte dos barcos que ali descarregam várias vezes ao dia. A estrutura apresenta-se com degradações significativas, nomeadamente delaminações, Figura 5.38 e Figura 5.39. São frequentes as áreas afectadas por delaminação de nível 3, mostrando por seu lado perdas de secção de nível 2 na maioria das áreas afectadas.



Figura 5.38 – Delaminação no CD NA 1 (arquivo pessoal).



Figura 5.39 – Delaminação no CD NA 1 (arquivo pessoal).

São igualmente visíveis sintomas de acções acidentais por impactos de barcos, com consequências graves ao nível estrutural para a durabilidade do cais. Estas acções são responsáveis pelo descasque do betão de recobrimento e consequente exposição das armaduras.

O facto de estar virado a SE (Sudeste) faz com que o cais de descarga esteja sujeito a diversas horas de sol por dia, situação esta com influência nos ciclos de molhagem/secagem e nas diferenças de temperatura a que o betão estará sujeito.

Por observação dos elementos fotográficos, pode definir-se o estado geral das PC a partir do catálogo de degradação (Quadro 5.15).

Quadro 5.15 – Quantificação da degradação do porto da Nazaré.

| <i>Nome</i> | <i>Exposição</i> | <i>Recob. Médio (cm)</i> | <i>Zona de estudo</i> | <i>Ficha I - Cor</i> | <i>Ficha II - Fissura</i> | <i>Ficha III - Delaminação</i> | <i>Ficha IV - Perda secção</i> |
|-------------|------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| CD NA 1 | Nascente | 4,5 | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 2 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 2 | 1 | 3 | 2 |
| PCE NA 2 | Nascente | 3,9 | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 1 | 2 | 2 | 2 |
| | Poente | | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 1 | 1 | 2 | 2 |
| PCE NA 3 | Nascente | 3,7 | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 1 | 2 | 2 | 2 |
| | Poente | | Marés | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Rebentação | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | | | Atmosférica | 1 | 1 | 2 | 2 |

Legenda: Marés: ZM, Rebentação: ZR, Atmosférica: ZA

5.7 Análise do teor de cloretos

Nesta fase, e tratando-se da penetração e corrosão por iões cloretos um dos principais responsáveis pela degradação das estruturas de betão armado nestes ambientes, importa perceber de que forma e em que quantidades esta se manifesta nas estruturas.

Para uma melhor percepção do efeito dos factores estudados através da análise visual das estruturas, foram retiradas amostras de pó de betão ao longo do seu recobrimento. As amostras foram retiradas nas diferentes zonas estudadas (atmosférica, rebentação e marê) e, nos casos em que foi possível, do lado nascente e poente da estrutura. Existiram no entanto cais, em que, por razões de acesso ou restrição, não foi possível retirar amostras para posterior estudo.

Retiraram-se amostras de quatro zonas de estudo, duas marítimas (PE e NA) e duas fluviais (MA e ME). No anexo III, apresentam-se representados os locais de recolha de amostras em cada uma das estruturas.

A recolha das amostras foi efectuada com auxílio de um berbequim s/ fios com potência para o efeito, um aparelho de recolha do pó, brocas próprias para o betão e água destilada para limpeza dos materiais após utilização. As amostras recolhidas foram colocadas em sacos e fechados para evitar possíveis contaminações. Na Figura 5.40, apresenta-se uma imagem dos materiais utilizados.



Figura 5.40 – Material utilizado na recolha de amostras de betão (arquivo pessoal).

5.7.1 Metodologia para avaliação do teor de cloretos

Os furos foram realizados em três etapas, com recolha do pó a cada interrupção. Da análise feita e dos recobrimentos medidos nas estruturas, verificou-se em média valores perto de 4 cm. Optou-se então por retirar as amostras de pó a 1 cm, 3 cm e 5 cm. Desta forma, ter-se-ia um perfil de cloretos mais ajustado antes e após as armaduras, permitindo assim perceber a evolução do teor de cloretos no betão.

Foram então retiradas amostras em diversas zonas dos cais analisados, com o intuito de perceber a variação da quantidade de cloretos ao longo do recobrimento nas diferentes zonas de estudo relativas ao nível do mar.

A análise das amostras recolhidas foi efectuada segundo a NP EN 196-2 que se refere aos métodos de ensaios de cimentos, parte 2 – Análise química dos cimentos. A análise baseia-se no método de Volhard, um método argentimétrico indirecto, onde a solução nítrica com o ião prata é titulada, na presença do ião ferro III, com tiocianato de amónio ou potássio. O método é aplicado à determinação de Cl^- , Br^- e I^- em meio ácido. A solução contendo os iões é precipitada com nitrato de prata e o excesso de prata é titulado com uma solução de tiocianato.

No anexo I.4, apresenta-se uma descrição do procedimento utilizado.

Uma vez que a recolha das amostras foi realizada com o auxílio de uma broca com diâmetro de 10 mm, as quantidades recolhidas não atingem o valor prescrito pela norma (5 g). Contudo, após contacto com o laboratório de análises químicas do LNEC, verificou-se que essa situação não tem significado no resultado final, uma vez que a quantidade de cloretos obtida através da fórmula 5.1, depende directamente da massa utilizada no ensaio.

$$Cl^- = \frac{1,773 \times 5(V_{18} - V_{17})}{1000 \times V_{18} \times m_{26}} \times 100 = 0,8865 \times \frac{V_{18} - V_{17}}{V_{18} \times m_{26}} \quad (5.1)$$

Onde,

m_{26} – massa da toma de ensaio de cimento (g);

V_{17} – volume da solução tiocianato de amónio necessário para a titulação da solução de ensaio em mililitro (ml);

V_{18} – volume da solução tiocianato de amónio necessário para a titulação do branco em mililitro (ml).

A execução de todo o procedimento, bem como a limpeza e manuseamento do equipamento foi cumprida de forma rigorosa e de acordo com as práticas laboratoriais correntes. De referir que a preparação de todos os reagentes, entre eles o ácido nítrico 1:2 e 1:100, utilizados no ataque e na lavagem respectivamente, foi igualmente feita de forma rigorosa. Na Figura 5.41, apresenta-se uma imagem dos materiais utilizados.



Figura 5.41 – Exemplo do equipamento utilizado na execução das análises de cloretos (Arquivo pessoal).

Os erros inerentes a este tipo de métodos clássicos são elevados, por se tratar de um método extenso e que requer boas práticas em laboratório. A sensibilidade da titulação final da solução de prata pelo tiocianato é grande, pelo que a existência de alguns desvios nos resultados não é de excluir. Contudo, pode-se afirmar que, de forma geral, o método foi cumprido de forma correcta e que os resultados obtidos representam o estado real das estruturas analisadas.

5.7.2 Análise e discussão dos resultados

A análise e interpretação da penetração de cloretos pode ser efectuada segundo vários processos. O processo mais simples consiste na representação gráfica (Figura 5.42) do teor em cloretos em função da profundidade obtendo-se o que genericamente se designa por perfil de concentração. A comparação visual destes perfis permite obter uma medida relativa do desempenho dos tipos de betões analisados em função dos parâmetros que se pretende analisar.

Os teores de cloretos obtidos nas análises realizadas variam entre os 0,685 e os 0,375 sendo de destacar o valor máximo elevado. Como esperado, o valor máximo é registado mais a superfície e o mais baixo a 5 cm de profundidade.

De acordo com os limites estabelecidos pelas normas em vigor, por exemplo a portuguesa, o limite crítico de cloretos para que não se verifique despassivação das armaduras é de 0,40 % em relação à quantidade de cimento utilizada.

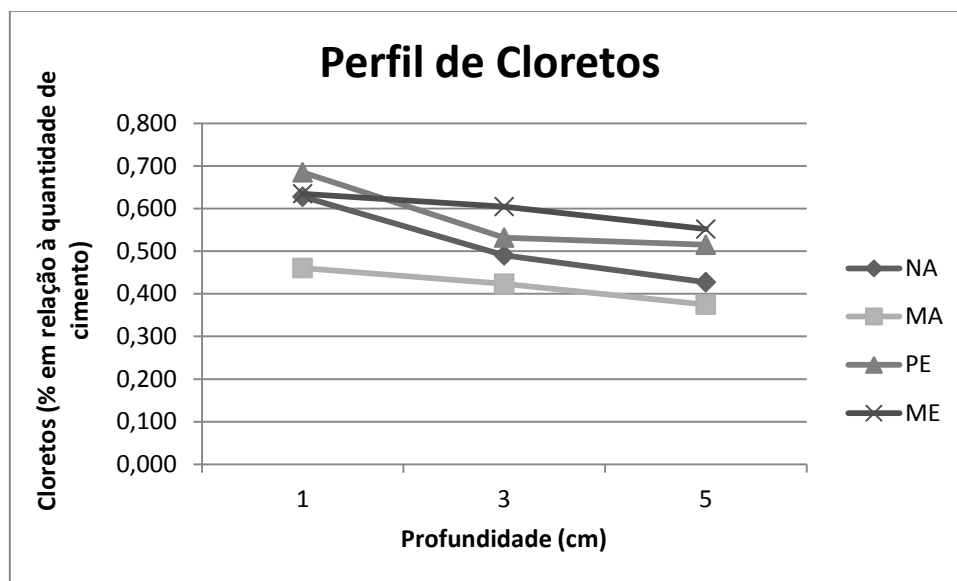


Figura 5.42– Perfil de cloretos para os cais considerados.

Os resultados apresentados correspondem à média para cada profundidade, de todas as amostras recolhidas nesse cais. Para verificar os perfis de cada amostra, ver anexo III.

Analisando os resultados por cais estudados podem-se retirar algumas conclusões:

- relativamente à análise dos gráficos confirma-se que na maior parte dos casos, os teores de cloretos são elevados e andam maioritariamente acima do teor crítico de cloretos para o betão (0,4%) definido no Quadro 4.1. Este aspecto vem confirmar o actual estado da maioria das estruturas analisadas;

- a curvatura obtida em cada um dos cais indica dá uma ideia da qualidade do betão utilizado e a forma como este condiciona a penetração dos cloretos. Verifica-se para as amostras PE e NA que a concentração de cloretos ao longo do recobrimento vai diminuindo progressivamente, o que pode indicar um betão menos poroso e mais compacto. De forma análoga para as amostras fluviais, ME e MA, as curvas apresentam um declive semelhante, com pouca variação ao longo do recobrimento. Este facto pode ser analisado pela qualidade do betão, que se assume ser mais baixa que as anteriores, ou pelo facto de as estruturas terem já uma vida útil extensa e consequentemente não apresentar as características desejadas para fazer face ao ambiente em questão;
- os valores obtidos em ambiente marítimo (30 anos exposição) são bastante superiores quando comparados com a amostra fluvial com 40 anos exposição (MA) e apresentam uma ordem de grandeza semelhante à amostra fluvial com 70 anos de exposição (ME). Pode-se considerar que, como referido em 5.5, o ambiente marítimo tem de facto uma maior agressividade a nível de cloretos, traduzida por um aumento no risco de corrosão;
- as diferenças encontradas nas amostras Fluviais, devem-se principalmente ao facto de a recolha no cais da Matinha (MA) ter incidido principalmente na estrutura mais recente, com cerca de 40 anos de exposição. No entanto, comparando os valores obtidos para a estrutura mais antiga da Matinha e do museu da electricidade (ME), verifica-se um teor mais alto no ME, situação que pode indicar uma pior qualidade do betão nesta última zona.

Podem ainda destacar-se individualmente:

- para o cais da Matinha - MA, as restantes amostras referentes à PC2, traduzem um maior teor de cloretos do lado Poente. Esta situação parece confirmar o referido na análise visual, relativamente à maior degradação apresentada desse mesmo lado. Mais uma vez os valores apresentados andam perto do teor crítico de cloretos, confirmando que o mecanismo de corrosão pode já ter tido início;
- no porto da Nazaré – NA, pode-se destacar que os valores obtidos comparando as zonas de recolha (marés e atmosférica), apresentam resultados surpreendentes, uma vez que de os valores na ZA foram ligeiramente superiores aos obtidos na ZM. As amostras retiradas tanto na PC2 como no CD referem-se ao lado nascente e apresentam valores elevados do teor de cloretos, contudo o CD apresenta valores constantemente superiores. Este resultado vem de encontro ao referido na análise visual, nomeadamente ao facto do CD se apresentar em piores condições, com maior extensão na degradação observada;

- para a amostra de Peniche - PE, refere-se o valor elevado de cloretos na nova zona do porto, com apenas 6 anos de vida útil. Este resultado vem contra o verificado na análise visual, uma vez que a estrutura não apresenta sinais de degradação. Esta situação pode indicar que o mecanismo de corrosão pode estar para se iniciar, facto nada esperado face aos anos de exposição da estrutura.

5.8 Síntese da investigação realizada

Na prática, a existência em ambiente marítimo/fluvial de uma variedade de condições de exposição com diferentes repercussões ao nível da durabilidade das estruturas de betão armado faz com existam inúmeros factores integrantes na degradação das estruturas, procurando-se nesta investigação perceber a sua influência na degradação.

A investigação efectuada demonstrou que os ambientes marítimo e fluvial apresentam uma grande agressividade para as estruturas de betão armado, nomeadamente para as condições de exposição em que o betão não está em contacto directo com a água do mar/rio (ZA – Zona atmosférica).

Relativamente aos dados climatéricos, observam-se diferenças de agressividade nos ambientes considerados. Os dados referentes à zona do estuário do Tejo (ambiente fluvial) mostram que os parâmetros insolação e precipitação são os que têm maior contributo na evolução da degradação (Quadro 5.4). Para a zona do Cabo Carvoeiro (ambiente marítimo), os mesmos dados mostram que os parâmetros vento e humidade relativa são os mais condicionantes nesta zona.

Com a recolha das amostras de água nos diferentes cais (4 em ambiente fluvial e 1 em ambiente marítimo), foi possível analisar os parâmetros cloretos, sulfatos, sódio, magnésio e pH. Os resultados da análise, embora previsíveis, vieram reforçar a ideia de que o ambiente marítimo é o com maior concentração de iões, nomeadamente os cloretos presentes nestas águas. A amostra da zona marítima (Peniche – PE) apresenta uma concentração mais elevada em praticamente todos os dados analisados (excepto pH), quando comparada com os valores das amostras fluviais (Quadro 5.7).

A análise visual da degradação dos diversos cais foi possível através do extenso levantamento fotográfica realizado pelo autor. Para uma uniformidade de análise, e de modo a facilitar a leitura e interpretação dos níveis de degradação, foi efectuada um catálogo dos níveis de degradação onde constam quatro fichas de anomalias, vulgarmente presentes nas estruturas sujeitas a estes ambientes.

Das anomalias consideradas no catálogo dos níveis de degradação, aquela que tem maior impacto visual e que traduz de forma mais aproximada o estado de degradação da estrutura é a delaminação do betão (ficha III).

Duma primeira análise visual, ressalta o facto de, da totalidade das estruturas observadas, cerca de 80% apresentar um nível elevado de degradação, associado a um nível 2 na ficha de delaminação do catálogo (Quadro 5.8 a Quadro 5.15). Dada a elevada delaminação analisada, foi possível constatar que as armaduras expostas se encontram corroídas, apresentando uma perda de secção em média de 30%, isto é, nível 2 na ficha de perda de secção do catálogo.

A análise visual permitiu ainda verificar diferenças de agressividade nas condições de exposição das estruturas. Pela observação das estruturas, é a zona atmosférica (ZA) que apresenta uma extensão de degradação superior, quando comparada com as restantes zonas de exposição (Quadro 5.8 a Quadro 5.15).

São igualmente visíveis diferenças de degradação no mesmo cais, associadas a diferenças na orientação da estrutura. Tome-se como exemplo o caso do cais da Matinha (MA), onde a exposição solar a que as PC estão sujeitas é totalmente diferente, sendo muito superior a exposição solar do lado Sul e praticamente nula do lado Norte (Quadro 5.8). Este facto é ainda mais evidente na zona do estuário do Tejo, onde a média diária de sol é de 7h30 min. As inspecções realizadas ao local permitiram comprovar que, depois das 10/11 h da manhã, o lado Norte deixa de receber sol.

Pode ainda resumir-se a influência de cada um dos factores estudados no Quadro 5.16.

Quadro 5.16 – Quadro síntese da influência dos factores estudados.

| <i>Estrutura Factores</i> | MA | ME | PO | CA | PB | PE | NA |
|---------------------------|--|--|---|--|--|--|---|
| <i>Zona de exposição</i> | Degradação superior na ZA | Degradação superior na ZA | Degradação superior na ZA | Degradação superior na ZA | Degradação superior na ZA | Degradação superior na ZA | Degradação superior na ZA |
| <i>Precipitação</i> | Maior influência | Maior influência | Maior influência | Maior influência | Maior influência | Menor influência | Menor influência |
| <i>Insolação</i> | Lado poente sujeito a maior insolação – Maior degradação | Insolação semelhante em ambos os lados – Ligeiro acentuar da degradação no lado nascente | Insolação semelhante em ambos os lados – Mesma degradação | Insolação semelhante em ambos os lados – Ligeiro acentuar da degradação no lado poente | Insolação semelhante em ambos os lados – Degradação acentuada no lado nascente | Insolação semelhante em ambos os lados – Ligeiro acentuar da degradação no lado nascente | Estruturas viradas a NE – Ligeiro acentuar da degradação no lado nascente |
| <i>Vento</i> | Lado nascente mais exposto - Menor degradação | Mesma influência do factor | Mesma influência do factor | Lado poente mais exposto – Maior degradação | Lado poente mais exposto – Menor degradação | Mesma influência do factor e maior significado neste ambiente | Lado poente mais exposto – Menor degradação, e maior significado neste ambiente |
| <i>Arquitectónicos</i> | Degradação em arestas salientes (pilares e lajes) e consolas | Degradação em arestas salientes de pilares | Degradação em arestas salientes de pilares | Degradação em arestas salientes (pilares e lajes) e consolas | Degradação em arestas salientes (pilares e lajes) e consolas | Menor extensão da degradação em arestas de pilares e lajes | Menor extensão da degradação em arestas de pilares e lajes |
| <i>HR</i> | Menor influência | Menor influência | Menor influência | Menor influência | Menor influência | Maior influência | Maior influência |
| <i>Temperatura</i> | Factor inconclusivo | Factor inconclusivo | Factor inconclusivo | Factor inconclusivo | Factor inconclusivo | Factor inconclusivo | Factor inconclusivo |
| <i>Recobrimento</i> | Baixo para o ambiente em análise | Baixo para o ambiente em análise | Baixo para o ambiente em análise | Baixo para o ambiente em análise | Baixo para o ambiente em análise | Baixo para o ambiente em análise | Baixo para o ambiente em análise |

A última etapa desta investigação incidiu no estudo do teor de cloretos das estruturas. Para isso, foram realizados furos nas estruturas ao longo do seu recobrimento, com recolha do pó a cada profundidade (1, 3 e 5 cm). As amostras foram levadas para laboratório, onde foram analisadas segundo a norma NP EN 196-2. Os resultados estão concordantes com o estado geral das estruturas, sendo os teores de cloretos obtidos maioritariamente superiores ao limite crítico definido pela norma (0,4% do peso de cimento).

De salientar que dos cais onde foram recolhidas amostras de pó de betão, as estruturas em ambiente marítimo datam da década de 80, enquanto que as estruturas em ambiente fluvial datam da década de 40. No entanto, os perfis de cloretos obtidos demonstram que as estruturas sujeitas a ambiente marítimo apresentam já níveis de cloretos bem acima do limite máximo sugerido pela norma e muito próximos dos obtidos para as estruturas fluviais com 70 anos de vida útil.

6. CONCLUSÕES

6.1 *Síntese da investigação efectuada*

A componente essencial da investigação desenvolvida na presente dissertação foi precisamente a metodologia do modelo de gestão da degradação que foi proposta e seguida. Esta metodologia baseou-se na inspecção de infraestruturas em serviço com recolha de amostras para posterior análise, na quantificação de anomalias e na identificação e caracterização de factores de degradação. É uma metodologia que emprega conhecimentos e técnicas variados, desde aqueles directamente ligados à Engenharia Civil, até conhecimentos de Química e técnicas laboratoriais, como os que foram necessários para a análise dos teores de cloretos presentes nas amostras recolhidas.

Começou-se por apresentar o tema e os objectivos que conduziram a elaboração deste trabalho, seguindo-se, a apresentação e descrição dos aspectos afectos à fase de projecto e construção deste tipo de estruturas. Esta descrição permitiu esclarecer as bases conceptuais daquilo que deve ser tomado como boas práticas para se construir com durabilidade em estruturas sujeitas a ambientes marítimo e fluvial.

Resumiu-se a informação essencial sobre os principais factores de degradação ao descrever detalhadamente a influência de cada um, na evolução da degradação neste tipo de estruturas. No final do capítulo 3, foi esclarecido o porquê da escolha de determinados factores para análise, em detrimento de outros.

No capítulo 4, seguiu-se a indispensável caracterização dos principais mecanismos de degradação e anomalias associados ao ambiente em que se desenvolvem. A elaboração de um catálogo de níveis de degradação mostrou ser essencial para a investigação que se seguiu. Este catálogo permite quantificar três níveis de degradação, associados a quatro fichas de anomalias (alteração cromática, fissuração, delaminação do betão e perda de secção das armaduras).

De seguida, procedeu-se à apresentação do estudo e das infraestruturas portuárias que serviram de base à investigação. Esta fase do estudo comportou duas etapas (*in situ* e laboratorial):

In situ

- através de um extenso levantamento fotográfico de todas as estruturas observadas;
- análise da orientação das estruturas face ao sol e dos níveis de maré na zona;
- recolha de amostras de água em diferentes zonas para posterior análise e comparação;

- extracção de amostras de pó de betão (em diferentes zonas e orientações) para posterior análise em laboratório do teor de cloretos;
- levantamentos da espessura do recobrimento e dos diâmetros das armaduras visíveis.

Em laboratório

- análise das amostras de água recolhidas em diferentes ambientes e comparação dos valores obtidos com os presentes na bibliografia consultada;
- análise das amostras de betão relativamente ao teor de cloretos no betão e comparação com os níveis definidos visualmente a partir do catálogo de degradação.

6.2 Conclusões gerais e trabalho futuros

Em primeiro lugar deve-se referir que a elaboração de um catálogo dos níveis de degradação foi uma ferramenta essencial para o desenvolvimento da investigação, nomeadamente a quantificação da degradação. Este catálogo pode também vir a servir de elemento base para futuros trabalhos nesta temática.

Optou-se por dividir as conclusões da investigação em três partes: a) Estado actual das estruturas; b) Influência dos Factores de Degradação; c) Comparação com outros autores.

a) Estado actual das estruturas

De salientar que os níveis de degradação observados revelam um estado de corrosão avançado, manifestado através da delaminação do betão de recobrimento.

A análise do comportamento das diversas infraestruturas portuárias demonstrou que a agressividade das condições de exposição no ambiente marítimo/fluvial é muito variável e que, sob o ponto de vista da corrosão das armaduras, é na zona atmosférica, que envolve pouco contacto directo com a água do mar/rio, que a degradação apresenta maior gravidade. Este aspecto revela a importância de uma análise cuidada das condições de exposição a que estas estruturas estão sujeitas, para que se possam implementar as medidas de protecção adequadas nas zonas mais sensíveis.

Verifica-se também que apesar da diferença de “idades” entre as estruturas marítimas e fluviais observadas, nalguns casos o nível de degradação é semelhante o que pode indicar que de facto o ambiente marítimo (concentração de iões superior confirmada através das análises de água) é mais agressivo para as estruturas. Os valores obtidos através das análises das amostras de água levadas a cabo levam a crer que a maior concentração de iões nas águas marítimas (principalmente cloretos e sódio) é mais agressiva para as estruturas de betão armado.

A realização de análises para aferir o teor de cloretos nas estruturas, permitiu confirmar algumas das conclusões referidas atrás. Por outro lado foi possível confirmar, através dos valores obtidos, o estado geral de degradação das estruturas definido com auxílio do catálogo dos níveis de degradação.

b) Influência dos Factores de Degradação

Da investigação efectuada podem-se retirar conclusões sobre a influência de determinados factores na degradação das estruturas:

- condições de exposição – conclui-se para as 22 estruturas analisadas, que a zona atmosférica é aquela onde se verifica maior extensão da degradação (Quadro 5.16);
- insolação – conclui-se que a insolação tem efeito na degradação, principalmente nas estruturas sujeitas a maiores tempos de insolação (Quadro 5.16). A degradação para estruturas orientadas a Sul (aproximadamente mesmo tempo de insolação) revelou um acentuar da extensão de degradação do lado virado a Nascente na maioria dos cais, situação essa a confirmar noutros estudos;
- precipitação – a dificuldade de observação da influência deste factor nas estruturas não permitiu que se concluísse sobre a sua influência;
- vento – conclui-se que o vento tem também influência nas estruturas. Confirma-se o referido por Salta (1996), ou seja que as estruturas mais protegidas apresentam, em geral, maior intensidade de penetração do que as estruturas expostas, pois estas últimas são também mais expostas às chuvas, sendo portanto mais lavadas (Quadro 5.16);
- temperatura – a pouca variabilidade dos valores obtidos da temperatura para os ambientes considerados não permitiu que se retirassem conclusões sobre a influência da temperatura no processo de degradação de infraestruturas portuárias;
- humidade relativa – a dificuldade de observação da influência deste factor nas estruturas não permite que se conclua com certezas sobre a influência deste factor;
- recobrimento – da análise da espessura do recobrimento nas estruturas onde foi possível obter uma estimativa desse valor, pode-se concluir que este apresenta valores baixos para o ambiente em redor. A média obtida para todas as estruturas é de 4 cm, valor baixo para fazer face à agressividade do meio;
- arquitectónico – conclui-se que, em praticamente todas as estruturas existe influência da arquitectura adoptada no desenvolvimento de mecanismos de degradação nas estruturas. Estes efeitos têm maior gravidade nas arestas salientes de pilares e na presença de consolas nas ligações pilar-laje. Este deverá ser um dos factores a ter em conta na concepção das estruturas (Quadro 5.16).

c) Comparação com outros autores

A investigação realizada veio, por um lado confirmar, certos factos mencionados por outros autores desta temática e, por outro, vem contrariar algumas considerações assumidas por diversos autores, nomeadamente a zona de exposição mais exposta à degradação. Podem-se destacar os seguintes factos:

- zona atmosférica mais degradada que as restantes – este aspecto contraria o obtido por Costa (1997) no seu estudo, no qual a zona de rebentação provou ser a mais condicionada e confirma o referido por Lima *et al.* (2006), McCarthy e Giannakou (2002) sobre o facto de a ZA ser uma zona normalmente bastante afectada pela corrosão;
- teor de cloretos mais elevado na zona atmosférica – este aspecto contraria o obtido por Costa (1997) nas suas análises sobre o teor de cloretos no betão em diferentes condições de exposição, onde a zona de marés provou ser a com maior concentração e vem de encontro ao obtido por Sandberg (1998);
- efeito do vento – as amostras de betão analisadas parecem confirmar o descrito por Salta (1996) relativamente ao efeito do vento na penetração de cloretos nas zonas mais protegidas;
- recobrimento – confirma-se o referido por Costa (1997) relativamente ao fraco desempenho de estruturas com recobrimentos inferiores a 50mm em ambientes marítimos;
- arquitectónicos – como referido por Coutinho (1998), a ausência de cuidados na execução de pormenores arquitectónicos (consolas, rebordos, arestas salientes) leva a um acentuar do efeito dos agentes agressores nessas zonas.

No essencial, considera-se que a investigação fornece resultados interessantes no que diz respeito à influência de determinados factores na degradação das estruturas.

Como trabalhos futuros, sugere-se que se melhore o catálogo dos níveis de degradação, através da definição matemática dos níveis de degradação e dos factores de degradação; que sejam elaborados novos modelos de previsão de durabilidade; deve-se também comparar a degradação de estruturas de betão armado à vista com a das estruturas pintadas. Sugere-se ainda que se aprofundem os conhecimentos relativos à monitorização das taxas de degradação reais. Por último, considera-se também que um aumento do número da amostra e das zonas consideradas (espalhar as amostras por todos o País) terá um efeito benéfico nos resultados fornecidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahmad, S. (2003) “Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction – a review”, at Cement & Concrete Composites.

Al-Khaja, W.A. (1997) “Influence of temperature, cement type and level of concrete consolidation on chloride ingress in conventional and high-strength concretes”, Construction and Building Materials, v. 11, n. 1, pp. 9-13.

Andrade, J. (2001). “Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos”. Tese de doutoramento. UFRGS Escola de Engenharia PPGECC

Appleton, J., Costa, A. (1999a). “Análise da penetração de Cloretos em estruturas de Betão Armado expostas ao Ambiente Marítimo”. RPEE, serie I – nº 46

Appleton, J., Costa, A. (1999b). “Assessment and repair of a Concrete Dockyard”, IABSE Symposium, Rio de Janeiro.

Appleton, J., Costa, A., França, P. (2004). “Efeitos estruturais da deterioração em Estruturas de betão armado”. Encontro Nacional Betão Estrutural. Porto.

Appleton, J.; Costa, A.; Moura, R.; Gonçalves, P.; Junior, D. (2000) “Reparação da Doca 22 do Estaleiro da Lisnave”. REPAR - Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas, Lisboa.

Battagin, A., Curti, R., Silva, C., Munhoz, F. (2002) “Influência das condições de cura em algumas propriedades dos concretos convencionais e de alto desempenho”, Instituto Brasileiro do Concreto - 44º Congresso Brasileiro, Belo Horizonte – MG.

Beleza, L. (1996) “A reparação de Betões”. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto.

Ben-Yair, M. (1974) “The effect of chloride on concrete in hot and arid regions”, Cement and Concrete Research journal, Vol.4, No.3, pp. 405-416.

Berkeley, K., Pathmanaban S. (1990) “Cathodic protection of reinforcement steel in concrete” London: Butterworths & Co. Ltd.

BRE (2005) “Concrete in aggressive ground”, Building Research Establishment Special Digest 1.

Castanho, P., Carvalho, J., Vera-Cruz, D. (1977) “Estudo do esquema geral de obras portuárias na enseada da Nazaré – Parte I – Estudo do regime fisiográfico”, Ministério dos Transportes e Comunicações, Lisboa.

Castro, P., Moreno, E.I., Genesca, J. (2000) “Influence of marine micro-climates on carbonation of reinforced concrete building”, Cement and Concrete Research 30, pp. 1565-1571.

CCS (1962) “Concrete in marine environments”, disponível em <http://www.concreteconstruction.net/concrete-articles/concrete-in-marine-environments.aspx>, visitado em 20/8/2011

Coito, M. (2008) “Avaliação probabilística da Vida Útil de Estruturas de Betão sob a Acção da Carbonatação e dos Cloretos”. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico.

Collepari, M. (2008) “Concrete durability in a marine environment”, Aci International Conference on Advances in Concrete Technology in the Middle East, Dubai (U.E.A.), disponível em www.encosrl.it/enco%20srl%20ITA/servizi/pdf/degrado/75.pdf.

Costa, A. (1997). “Durabilidade de estruturas de betão armado em ambiente marítimo”, Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico.

Coutinho, S. J. (1998) “Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem”, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto.

Coutinho, S. J. (2001) “Durabilidade - Ataque por Sulfatos”, Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto.

da Silva, T. (2007). “Análise Técnico-Económica de alguns tipos de reparação de estruturas de Betão Armado expostas a um ambiente marítimo”. Tese de Mestrado. Instituto Superior Técnico.

EB-I (2011) “Folhas de apoio à cadeira de Estruturas de Betão I, Módulo 6- Durabilidade de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado”. Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Ferreira, R. (2000) “Avaliação de ensaios de Durabilidade do Betão”. Tese de Mestrado. Universidade do Minho, Guimarães.

Ferreira, R. (2004) “Probability-based durability analysis of Concrete Structures in Marine Environment”. Tese de Douturamento. Universidade do Minho, Guimarães.

Ferreira, R. (2006) “Optimização da vida útil das Estruturas de Betão Armado”. 4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas. Lisboa.

Ferreira, J. (2009) “Construção de edifícios em ambiente aquático”. Tese de Mestrado. Instituto Superior Técnico.

Folic, R., Zenunovic, D. (2010) “Durability design of concrete structures – Part 2: Modelling and structural assessment”, Architecture and Civil Engineering vol. 8, N^o1, pp. 45-66.

Ghandehari M., Zulli M., Shah S. (1999). ”Influence of Corrosion on Bond Strength in Reinforced Concrete”. Transport Properties and Microstructure of Cement-Based Systems, Proceedings Materials Research Society Symposium, Boston Massachusetts (CONFERENCIA)

Haque, M., Al-Khaiat, H. (1997) “Carbonation of Concrete Structures in Hot dry Coastal Regions”. Cement and Concrete Composites 19, pp 123-129.

Heckrodt, R. O. (2002) “Guide to deterioration and failure of building materials”, published by Thomas Telford Ltd, 1 Heron Quay, London E14 4JD.

Helene, P. R. L. (1993) “Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado”. Tese (Livre Docente), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil.

INMG, (1991) “O clima de Portugal – Fascículo XLIX vol 2 – 2^a região, Normais Climatológicas da região de Ribatejo e Oeste entre 1951-1980”, Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica, Lisboa.

Jâcome, C, e Martins, J. (2005) “Identificação e tratamento de patologias em edifícios”, Textos, Universidade Fernando Pessoa, Porto.

Jang, B., Oh, B. (2010) “Effects of non-uniform corrosion on the cracking and service life of reinforced concrete structures”, Cement and Concrete Society, vol. 40, pp. 1441-1550.

Lança, P. (2011) “Conservação e Reabilitação da Construção”, Documentos de apoio às aulas, ESTIG- Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Beja, disponível em

http://www.estig.ipbeja.pt/~pdnl/Subpaginas/Conservacao%20de%20edificios_files/Documentos/Aulas/BA/BA%20-%20durabilidade%20e%20corrosao_web.pdf

Lima, J. M., Pacha, J (2010) disponível em <http://patologiaestrutura.vilabol.uol.com.br/>

Lima, M., Mazer, W., Brito, P., Morelli, F., Lencioni, J. (2006) “Durabilidade de estruturas de concreto em ambiente marinho – importância dos estudos envolvendo microclima”.

Liu, P. (1991). “Damage to concrete structures in a marine environment”. *Materials and Structures*, 24, pp 302-307

LNEC, (2008). “Modelação da acção do meio ambiente na corrosão de armaduras”. Plano de Investigação Programada, Lisboa.

Mackechnie, R.J. (2001) “Predictions of reinforced concrete durability in the marine environment” Research Monograph no. 1, University of Cape Town.

McCarthy, M., Giannakou, A. (2002) “ In-situ performance of CPF concrete in coastal environment”, *Cement and Concrete Research*, vol. 32, pp. 451-457.

Medeiros, M., Gobbi, A., Réus, G., Helene, P. (2010) “Influência da altura e posição da edificação na penetração de cloretos: Estudo de caso em obra no Rio de Janeiro – Brasil”, CINPAR, VI Congresso Internacional sobre Patologia e Recuperação de Estructuras, Córdoba – Argentina.

Mehta, P., Monteiro, P. J.M. (1994) “Concreto: estrutura, propriedades e materiais”, 1ª edição, São Paulo.

Mehta, P. (1980) “Durability of concrete in marine environment – a review”, American Concrete Institute, ACI-SP65.

Mehta, P. (2001) “Reducing the environmental impact of concrete”, *Concrete International*.

Monteiro, I. (2010) “Modelação da evolução da carbonatação em elementos de betão armado”, Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico.

Neville, A.M. (1982) “Propriedades do concreto”, tradução Salvador E. Giammuss, São Paulo, PINI, Brasil, 1982.

Neville, A.M. (2000) “Good reinforced concrete in Arabian Gulf”, *Materials and Structures* vol. 33, pp. 655-664

Odriozola, M. (2007) “Corrosión de las armaduras del hormigón armado en ambiente marino: Zona de carrera de mareas y zona submergida” Tesis doctoral, Universidade Politécnica de Madrid. (em espanhol).

Odriozola, M., Gutiérrez, P. A. (2007) “Permeabilidad a los cloruros del hormigón armado situado em ambiente marino sumergido”, Revista Ingeniería de Construcción, v.22 nº1, p. 15-22.

Polito, G. (2006). “Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação”. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas. disponível em: <http://www.cecc.eng.ufmg.br/trabalhos/Monografia%20Giulliano%20Polito.pdf>.

Pontes, R. (2006) “Disseminação de íons cloreto na orla marítima do bairro de Boa Viagem, Recife-PE” Dissertação de Mestrado, Universidade Católica de Pernambuco.

PRC (2011) “Anomalias em betão armado e pré-esforçado”, slides de PRC – Patologia e Reabilitação da Construção, Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, disponível em http://www.fileden.com/files/2009/4/22/2414246/9___Anomalias_em_bet_o_armado_e_pr_esfor_ado.pdf

Rashid, M., Khatun, S., Uddin, M., Nayeem, M. (2010) “Effect of strength and covering on concrete corrosion”, EJSR, ISSN 1450-216X, vol. 40 no. 4, pp. 492-499.

Rincón, O. T.; Carruyo, A. R.; Andrade, C.; Helen, P.; Diaz, I. (1998) “Manual de inspeccion, evaluacion y diagnostico de corrosion em estructuras de hormigon armado”. DURAR – Red Tematica XV.B – Durabilidad de la armadura. (em espanhol)

Romano, F. (2009) “Estudo do ingresso de cloretos em concretos localizados no litoral norte do Rio Grande do Sul“, Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Rostam, S. (2001) Service Life Design of Concrete Structures - The potentials of the DuraCrete Methodology. DuraNet – 3rd Workshop SLD of Concrete Structures. Tromsø, pp 48-68.

RRE (2011) “Folhas de apoio à disciplina de Reforço e Reabilitação de Estruturas, Módulo 2 - Mecanismos de Deterioração”, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Salta, M. Manuela (1996) “Introdução à corrosão do aço no betão. Modelos de comportamento às acções agressivas”, Prevenção da Corrosão em Estruturas de Betão Armado, Seminário, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Outubro, pp. 13-55; Portugal.

Salta, M. Manuela. (2006). “Prevenção da corrosão no betão armado - Materiais em ambiente marítimo”. Seminário, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Funchal.

Sandberg, P. (1998) “Chloride initiated reinforcement corrosion in marine concrete”, Report TVBM-1015, Division of Building Materials University of Lund, Lund.

Scannel, W., Sohngpurwala, A. (1994) “Repair and protection of concrete exposed to seawater”, Concrete corrosion specialists, CONCORR.

Silva, F., Liborio, J. (2005) “Durabilidade do concreto de alto desempenho com sílica de Fe-si ou silício metálico em ambientes marinho”. Vetor, Rio Grande. pp 35-47.

Souza, K. (2005). “Estudo experimental e probabilístico da vida útil de estruturas de concreto armado situadas em ambiente marítimo: influência do grau de saturação do concreto sobre a difusividade de cloretos”. Tese de Mestrado Engenharia Oceânica, Fundação Universidade Federal do Rio Grande.

Thaulow, N. (2007) “Carbonation of Concrete Structures”, Monroeville, USA.

Val, D., Stewart, M. (2003). “Life-cycle cost analysis of reinforced concrete structures in marine environment”. Structural Safety 25, pp. 343-362.

Vilasboas, J. (2004) “Durabilidade das edificações de concreto armado em Salvador: uma contribuição para a implantação da NBR 6118:2003”, Universidade federal da Bahia – Escola Politécnica, Deptº de Engenharia Ambiental.

Vu, K., Stewart, M. (2002). “Service Life Prediction of Reinforced Concrete Structures exposed to aggressive environments”. 9th Durability of Building Materials and Components conference. Brisbane, Australia.

Wall, H. (2007). “Chloride profiling in marine concrete – methods and tools for sampling”. Licentiate Thesis. Lund Institute of Technology, Lund.

Normas e especificações

BS – 3649-1:2000. “Marine Structures – Part I: Code of Practice for General Criteria”. British Standards

DIN 4030-2 (1991). “Assessment of water, soil and gases for their aggressiveness to concrete; collection and examination of water and soil samples” Deutsches Institut für Normung.

WEBgrafia

Google Earth @ (2011) <http://earth.google.com/intl/pt/>

ANEXOS

Anexo I - Descrição dos métodos de análise de águas e cimento

Anexo I.1 - Método SMEWW 4500-H⁺

Introdução

A medição de pH é um dos testes mais importantes e mais usadas nos estudos dos parâmetros químicos da água. De uma forma geral, praticamente todos os tipos de tratamento de águas se baseiam no controlo do nível de pH da água. O pH é usado na medição da alcalinidade, de dióxido de carbono e de outros equilíbrios ácido-básico. Para uma dada temperatura, a intensidade do carácter ácido ou básico de uma solução é indicada pelo pH ou actividade dos iões hidrogénio. Por alcalinidade e acidez, pode entender-se a capacidade de neutralização ácida e básica da água e são normalmente dados em miligramas (mg) CaCO₃ por litro.

Método Electrométrico

O princípio básico da medição de pH por métodos electrométricos está na determinação da actividade dos iões hidrogénio, por medição potenciométrica, usando um eléctrodo hidrogénio padrão e um eléctrodo de referência. O eléctrodo hidrogénio é composto por um eléctrodo de platina através do qual o gás hidrogénio é borbilhado a uma pressão de 101 kPa. Dada à dificuldade de uso e o elevado potencial de contágio do eléctrodo de hidrogénio, é comum utilizar-se um eléctrodo de vidro.

A força electromotriz (efm) produzida no eléctrodo de vidro varia linearmente com o pH da solução.

As medições de pH são afectadas pela temperatura de duas formas: causas mecânicas e causas químicas. As causas mecânicas tem a ver com mudanças nas propriedades dos eléctrodos e demora destes em atingir o equilíbrio após variações de temperaturas.

Desta forma, a temperatura à qual o teste é feito é sempre referida nos resultados das análises (tal como aconteceu nestas análises).

Descrição do equipamento

Medidor pH – consiste num potenciómetro, um eléctrodo de vidro, um eléctrodo de referência (ou um eléctrodo combinado) e um dispositivo de ajuste da temperatura. O circuito é completo quando os eléctrodos são mergulhados na solução de ensaio. Muitos medidores

são capazes de ler pH ou milivolts (mV) e alguns tem escalas de milésimas de pH. No entanto, para trabalhos comuns é usual considerar-se um medidor até às décimas de pH com um intervalo de 0-14 e equipado com dispositivo de ajuste da temperatura.

Eléctrodo de referência – consiste numa “half cell” que fornece um potencial constante. São usados frequentemente eléctrodos de cloreto de prata, com diversos tipos de líquidos para a junção líquida dos eléctrodos de referência. A junção pode ser de vários tipos sendo no entanto o de quartzo o mais utilizado.

Eléctrodo de vidro – O sensor do eléctrodo é composto por um vidro especial com uma concentração de HCl fixa ou uma solução de cloreto em contacto com um eléctrodo de referência interno. Após se mergulhar um novo eléctrodo na solução, desenvolvem-se trocas de iões sódio por iões hidrogénio que acabam por formar uma camada superficial de iões hidrogénio. Este fenómeno produz na zona de interface vidro-solução um potencial que é função da actividade dos iões de hidrogénio na solução. Existem diversos tipos de eléctrodos de vidro disponíveis, sendo necessário adoptar-se os eléctrodos de vidro consoante o valor de pH esperado.

Agitador, câmara de fluxo e provetas

Procedimento

Calibração do equipamento – A calibração do equipamento e o seu armazenamento são aspectos muito importantes para a fiabilidade dos resultados. Os eléctrodos devem estar mergulhados, numa solução de armazenamento, sempre que o potenciómetro não está em utilização. Antes de se usar os eléctrodos devem ser retirados da solução de armazenamento, lavados, secos e colocados em três tipos de solução inicial (com diferentes pH's). Após retirados os eléctrodos das soluções, existe sempre um processo de lavagem igual ao descrito anteriormente. Uma vez retirados os eléctrodos da 1ª amostra e definido um ponto de partida de pH, devem ajustar-se as temperaturas de ambos os eléctrodos (vidro e referência) para o mesmo valor. Em seguida, colocados numa 2ª solução com valores de pH num intervalo de duas unidades ao pH da amostra medido na 1ª solução. Deve ainda registar-se a temperatura e ajusta-la no potenciómetro até se obter o valor de pH. Uma vez retirados da 2ª solução, os eléctrodos são mergulhados finalmente na 3ª solução, com pH 3 unidades diferente da 2ª solução e medido o valor de pH, que não deve ter uma diferença superior a 0,1 do pH da 3ª solução.

Este processo pretende ajustar a resposta do eléctrodo de vidro na análise.

Anexo I.2 - Método SMEWW 4110-B

Introdução

A determinação dos aniões mais comuns, tais como brometo, cloreto, fluoreto, nitrato, fosfato e sulfato é um parâmetro normalmente importante para caracterizar uma água e/ou para avaliar a necessidade de tratamento específico. Apesar dos métodos convencionais de eletrometria e colorimetria disponíveis para a determinação individual de aniões, a cromatografia iónica apresenta uma única técnica instrumental que pode ser usada de forma rápida e sequencial. Esta técnica elimina ainda a necessidade de se usarem reagentes perigosos na reacção.

Este método é aplicável após a filtragem de partículas de diâmetros superiores a 0,2 µm.

Descrição do equipamento

Cromatógrafo iónico – O cromatógrafo deve incluir uma válvula de injeção, pré coluna e coluna de separação, célula de condutividade e software de aquisição e tratamento de dados. O cromatógrafo deve ser capaz de injectar 2-5 ml de eluente/min a uma pressão de 1400-6900 kPa.

Coluna de separação de aniões – em material adequado (resina) com baixa capacidade de troca anódica e capaz de distinguir e quantificar os diversos tipos de aniões presentes na água.

Pré coluna – deve ser igual à de separação para proteger a coluna de separação de partículas orgânicas.

Reagentes

Água destilada ou desionizada – livre de interferências, filtrada através de uma membrana de 0,2 µm para evitar o entupimento das colunas e com condutividade baixa;

Solução eluente – Dissolver 0,5712 g de NaHCO₃ e 0,7632 g Na₂CO₃ em água e diluir a 4 l;

Solução regenerante – Diluir 2,8 ml de H₂SO₄ a 4 l;

Procedimento

Equilíbrio do sistema – Ligar o cromatógrafo de iões e ajustar o fluxo de solução eluente para valores apropriados (cerca de 2 ml/min). Deixar o sistema atingir o equilíbrio.

Calibração – Injectar os padrões contendo um anião ou uma mistura de aniões e determinar os tempos de retenção. Esses tempos variam com as condições, no entanto, caso se utilizem solução padrão de eluente e uma coluna de separação de aniões, a retenção é dada em relação a aniões F⁻, Cl⁻, NO₂⁻, Br⁻, NO₃⁻, HPO₄⁻ e SO₄⁻. Devem injectar-se três tipos de concentração para cada anião a analisar e avaliar a curva

Anexo I.3 - Método EPA 300.7

Introdução

Este método é aplicável à determinação de íões sódio, amónio, potássio, magnésio e cálcio, em meio aquoso pelo princípio da cromatografia iónica.

Descrição do equipamento

Cromatógrafo iónico – O cromatógrafo deve incluir uma válvula de injeção, pré coluna e coluna de separação, célula de condutividade e software de aquisição e tratamento de dados. O cromatógrafo deve ser capaz de injectar 2-5 ml de eluente/min a uma pressão de 1400-6900 kPa.

Coluna de separação de aniões – em material adequado (resina) com baixa capacidade de troca anódica e capaz de distinguir e quantificar os diversos tipos de aniões presentes na água.

Coluna de supressão de aniões – Deve ser colocada após a coluna de separação e pode ser de dois tipos, como descrito na norma.

Pré coluna – Deve ser igual à de separação para proteger a coluna de separação de partículas orgânicas.

Reagentes

Água destilada ou desionizada – livre de interferências, filtrada através de uma membrana de 0,2 µm para evitar o entupimento das colunas e com condutividade baixa;

Solução eluente – Dissolver 0,5712 g de NaHCO₃ e 0,7632 g Na₂CO₃ em água e diluir a 4 l;

Solução regenerante – Diluir 2,8 ml de H₂SO₄ a 4 l;

Procedimento

Equilíbrio do sistema – Ligar o cromatógrafo de íões e ajustar o fluxo de solução eluente para valores apropriados (cerca de 2 mL/min). Deixar o sistema atingir o equilíbrio.

Calibração – Injectar os padrões contendo um anião ou uma mistura de aniões e determinar os tempos de retenção. Esses tempos variam com as condições, no entanto, caso se utilizem solução padrão de eluente e uma coluna de separação de aniões, a retenção é dada em relação a aniões F⁻, Cl⁻, NO₂⁻, Br⁻, NO₃⁻, HPO₄⁻ e SO₄⁻. Devem injectar-se três tipos de concentração para cada anião a analisar e avaliar a curva

Anexo I.4 – NP EN 196-2

Parte 14 - Determinação de cloretos

Princípio

Este método dá o teor total de cloretos mais brometos e o resultado é expresso em ião cloreto (Cl^-). O cimento é tratado com ácido nítrico diluído fervente para o decompor e para eliminar os sulfuretos. O cloreto dissolvido é precipitado utilizando um volume conhecido duma solução padrão nitrato de prata. Depois da ebulição, o precipitado é lavado com ácido nítrico diluído e rejeitado. O filtrado e as águas de lavagem são arrefecidos abaixo de 25°C e o nitrato de prata residual é titulado com uma solução padrão de tiocianato de amónio, utilizando um sal de ferro (III) como indicador.

Procedimento

Pesar a $\pm 0,0005g$ ($5,00\pm 0,05$)g de cimento (m_{26}), num copo largo de 400 ml adicionar 50mL de água e, misturando com um agitador de vidro, adicionar 50 ml de ácido nítrico 1+2 (4.13).

Aquecer a mistura até à ebulição (na “hotte” para as amostras contendo sulfuretos), agitando de tempos em tempos sem perda de líquidos, e deixar ferver durante cerca de 1min ou 2min. Retirar da fonte de calor e, por meio de uma pipeta, adicionar 5 ml de solução nitrato de prata à solução. Fazer ferver durante 1 a 2 min e filtrar, através de um papel de filtro grosso, anteriormente lavado com ácido nítrico 1+100 para um erlenmeyer 500 ml. Lavar o copo, o agitador de vidro e o papel com ácido nítrico 1+100 até que o volume de filtrado e águas de lavagem seja aproximadamente 200 ml. Arrefecer ambos abaixo de 25°C numa luz filtrada ou no escuro.

Adicionar até 5mL de indicador (4.81) e titular com a solução de tiocianato de amónio (4.79), agitando vigorosamente até que a gota desta solução produza uma coloração fraca que não desaparece agitando. Anotar o volume V_{17} da solução de tiocianato de amónio utilizado na titulação. Se V_{17} for inferior a 0,5ml repetir o procedimento com metade da massa de amostra.

Efectuar a mesma operação sem amostra de cimento e anotar o volume V_{18} da solução de tiocianato de amónio utilizado para a titulação do branco.

Cálculo e expressão de resultados

$$Cl^- = \frac{1,773 \times 5(V_{18} - V_{17})}{1000 \times V_{18} \times m_{26}} \times 100 = 0,8865 \times \frac{V_{18} - V_{17}}{V_{18} \times m_{26}}$$

m_{26} – massa da toma de ensaio de cimento (g)

V_{17} – volume da solução tiocianato de amónio necessário para a titulação da solução de ensaio em mililitro

V_{18} – volume da solução tiocianato de amónio necessário para a titulação do branco em mililitro

Anexo II - Apresentação dos valores climatéricos

Em seguida apresentam-se os dados climatéricos para cada uma das estações estudadas, bem como informação mais detalhada sobre as estações e os dados.

Os parâmetros estudados relativamente ao clima apresentam-se no capítulo 5.

Anexo II.1 - Lisboa - Tapada da Ajuda

Estação funciona desde 1914 nas instalações do Instituto Superior de Agronomia. Está situada nas coordenadas 38°42' N e 9°11' O, e apesar da sua proximidade ao mar, o posto de recolha dos dados encontra-se 50 m acima do nível do mar.

Após consulta das Normais Climatológicas 41-70 e 51-80, os dados recolhidos são apresentados no Quadro II.1.

Quadro II.1 – Dados climatéricos para estação da Tapada da Ajuda.

| Lisboa - Tapada da Ajuda | | | | | | | |
|---------------------------------|------------------------------|-------------|-------------|----------------------|-------------|--------------------------|--------------|
| Temperatura média (°C) | Humidade relativa (%) | | | Insolação (h) | | Precipitação (mm) | |
| | 9h | 15h | 18h | Total | % | | |
| Mensal | 9h | 15h | 18h | Total | % | Total | |
| 11 | 84 | 72 | 81 | 131,2 | 44 | 111,8 | JAN |
| 11,7 | 81 | 67 | 77 | 148,1 | 50 | 99,1 | FEV |
| 13,1 | 79 | 63 | 75 | 184,5 | 50 | 97,8 | MAR |
| 14,9 | 74 | 57 | 71 | 235,5 | 60 | 51,6 | ABR |
| 17,1 | 75 | 56 | 72 | 287 | 66 | 41,3 | MAI |
| 19,7 | 74 | 55 | 70 | 299,8 | 69 | 21,4 | JUN |
| 21,9 | 72 | 50 | 66 | 350,3 | 80 | 2,8 | JUL |
| 22,3 | 74 | 48 | 67 | 332,6 | 80 | 5,2 | AGO |
| 20,9 | 78 | 55 | 71 | 248,7 | 68 | 29,5 | SET |
| 18,1 | 79 | 60 | 73 | 199,1 | 58 | 75,5 | OUT |
| 14,1 | 81 | 67 | 77 | 156,4 | 52 | 94,8 | NOV |
| 11,5 | 83 | 72 | 79 | 137,9 | 48 | 100 | DEZ |
| 16,4 | 77,8 | 60,2 | 73,3 | 225,9 | 60,4 | 60,9 | Média |
| - | 70,4 | | | 2711,1 | - | 730,8 | Ano |

Relativamente ao vento, os valores são apresentados no Quadro II.2.

Quadro II.2 – Valores do vento para a estação da Tapada da Ajuda.

| Lisboa - Tapada da Ajuda | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|------------|------------|------------|-------------|------------|------------|----------------------|--------------|----|
| Vento | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Frequência do vento (%) e velocidade média (km/h) para cada rumo | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N | | NE | | E | | SE | | S | | SW | | W | | NW | | C | Vel méd (km/h) | Direcção | |
| 17 | 6,2 | 14,3 | 5,8 | 9,9 | 5,7 | 5,8 | 5,4 | 6 | 8,4 | 13 | 8,2 | 5,8 | 7,6 | 22,2 | 6,6 | 6 | 7,6 | JAN | NW |
| 14,5 | 6,6 | 11,6 | 5,7 | 9 | 6,8 | 4,8 | 6,8 | 6,7 | 9 | 17 | 8,5 | 8,1 | 7,3 | 26 | 7,1 | 2,3 | 8,6 | FEV | NW |
| 18,7 | 7,6 | 10,7 | 6,4 | 8,7 | 5,5 | 6 | 6,4 | 4,5 | 6,2 | 10,7 | 6,6 | 10,1 | 7,1 | 29,5 | 7,2 | 1,1 | 7,6 | MAR | NW |
| 20,1 | 7,7 | 5,5 | 8,1 | 6 | 6,3 | 8,9 | 5,3 | 5 | 7,3 | 11,1 | 6,8 | 7,9 | 7,4 | 35,2 | 7,6 | 0,3 | 7,7 | ABR | NW |
| 17,6 | 8,4 | 6,2 | 7,7 | 2,5 | 6 | 6,7 | 7 | 5,9 | 7,5 | 12,3 | 7,9 | 8,1 | 7,5 | 40,3 | 8,5 | 0,4 | 7,7 | MAI | NW |
| 19,1 | 8,8 | 5,2 | 6,7 | 3,9 | 7,3 | 7,6 | 6,4 | 4,8 | 8 | 13,2 | 7,7 | 9,2 | 8,1 | 36,8 | 9 | 0,2 | 8,1 | JUN | NW |
| 21,6 | 9 | 6,7 | 7,5 | 3,4 | 6,5 | 8,4 | 6,2 | 3,5 | 6,4 | 9,8 | 7 | 7,9 | 7,6 | 38,6 | 9,8 | 0,1 | 8,8 | JUL | NW |
| 23,3 | 9,6 | 7,9 | 7,6 | 2,1 | 7 | 7,9 | 6,7 | 3,8 | 6,4 | 8,8 | 7,2 | 5,1 | 8,3 | 40,8 | 9,5 | 0,3 | 8,7 | AGO | NW |
| 18,4 | 8 | 5,2 | 6,7 | 4,2 | 6,3 | 12,2 | 5,9 | 5,2 | 6,9 | 14,3 | 7,3 | 3 | 7,9 | 36,6 | 8,1 | 0,9 | 7,4 | SET | NW |
| 17,2 | 7,1 | 8,5 | 5,5 | 5,7 | 5,8 | 10 | 6,4 | 6,3 | 7,6 | 13,7 | 7,1 | 9,4 | 6,6 | 27,6 | 7,1 | 1,6 | 7 | OUT | NW |
| 19,8 | 6,1 | 14,5 | 5,6 | 9,2 | 6 | 7,5 | 5,2 | 3,8 | 8,3 | 7,9 | 7,7 | 5,5 | 5,9 | 29,8 | 6,2 | 2 | 7,1 | NOV | NW |
| 20,1 | 6 | 16,5 | 5,9 | 12,8 | 5,9 | 7 | 6 | 6,9 | 8,5 | 8,8 | 8,6 | 4 | 6,8 | 18,6 | 6,9 | 5,3 | 7,6 | DEZ | N |
| 19,0 | 7,6 | 9,4 | 6,6 | 6,5 | 6,3 | 7,7 | 6,1 | 5,2 | 7,5 | 11,7 | 7,6 | 7,0 | 7,3 | 31,8 | 7,8 | 1,7 | 7,8 | Média | |

Anexo II.2 - Cabo Ruivo

A estação situa-se na parte oriente da cidade de Lisboa, com coordenadas 38°45' N e 9°06' O, com o posto de recolha 9 m acima do nível do mar.

Após consulta das Normais Climatológicas 41-70 e 51-80, os dados recolhidos são apresentados no Quadro II.3.

Quadro II.3 – Dados climatéricos para estação de Cabo Ruivo.

| Cabo Ruivo | | | | | | | |
|-------------------------------|------------------------------|------------|--------------|----------------------|--------------|--------------------------|--------------|
| Temperatura média (°C) | Humidade relativa (%) | | | Insolação (h) | | Precipitação (mm) | |
| | 9h | 15h | 18h | Total | % | | |
| Mensal | | | | | | Total | |
| 11,2 | 89 | 76 | 85 | 109,2 | 36 | 116,2 | JAN |
| 12,1 | 84 | 70 | 82 | 152,6 | 59 | 105,6 | FEV |
| 13,4 | 81 | 64 | 80 | 180,4 | 49 | 87,1 | MAR |
| 15,3 | 77 | 61 | 78 | 253,6 | 64 | 52,1 | ABR |
| 17,7 | 72 | 54 | 74 | 321,8 | 72 | 43,3 | MAI |
| 20,5 | 70 | 53 | 73 | 314,4 | 69 | 19,8 | JUN |
| 22,8 | 70 | 49 | 71 | 369,1 | 82 | 2,9 | JUL |
| 23,1 | 72 | 48 | 71 | 337,7 | 80 | 6,7 | AGO |
| 21,7 | 77 | 54 | 74 | 260,9 | 70 | 24 | SET |
| 18,5 | 82 | 61 | 79 | 222,1 | 64 | 74,6 | OUT |
| 14 | 85 | 69 | 83 | 142,4 | 47 | 91,1 | NOV |
| 11,3 | 86 | 73 | 83 | 128,2 | 43 | 98,4 | DEZ |
| 16,8 | 78,75 | 61 | 77,75 | 232,7 | 61,25 | 60,15 | Média |
| - | 72,5 | | | 2792,4 | - | 721,8 | Ano |

O parâmetro vento na estação de Cabo Ruivo, devido à orientação da estação a que está virada apresenta frequências de vento ligeiramente diferentes. No Quadro II.4, apresentam-se esses valores.

Quadro II.4 – Valores do vento para a estação do Cabo Ruivo.

| Cabo Ruivo | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|----------------------|--------------|----|
| Vento | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Frequência do vento (%) e velocidade média (km/h) para cada rumo | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N | | NE | | E | | SE | | S | | SW | | W | | NW | | C | Vel méd (km/h) | Direcção | |
| 18,5 | 10,1 | 13,2 | 10,3 | 6 | 10,4 | 5,6 | 9 | 15,6 | 17 | 10,1 | 12,1 | 10,6 | 12,8 | 11 | 10,2 | 9,4 | 11,3 | JAN | N |
| 24,4 | 11,1 | 10,3 | 12,6 | 5,8 | 10,7 | 4,3 | 9,4 | 12,1 | 16,7 | 9,1 | 13,8 | 11,4 | 13,9 | 14,7 | 13 | 7,9 | 12,6 | FEV | N |
| 20,5 | 12,4 | 12,4 | 12,6 | 5,8 | 9,4 | 6,5 | 9,7 | 11,7 | 16,5 | 11 | 14 | 9,5 | 12,9 | 16,1 | 15,1 | 6,5 | 12,3 | MAR | N |
| 25,8 | 15,3 | 9,5 | 12,4 | 3,8 | 8,6 | 4 | 8,8 | 10,3 | 17,3 | 10,6 | 13,3 | 12,7 | 13,8 | 18,9 | 18,9 | 4,4 | 13,8 | ABR | N |
| 21,6 | 16,2 | 11,8 | 11,3 | 2,3 | 8,4 | 3,4 | 8,8 | 7,4 | 15,3 | 10,3 | 14,4 | 13 | 15,1 | 26,4 | 16,7 | 3,8 | 14,3 | MAI | NW |
| 21,8 | 16,4 | 8,6 | 11,6 | 2,7 | 7,4 | 3,3 | 7,8 | 6,7 | 12,9 | 9,7 | 14,4 | 10,3 | 13,3 | 32 | 16,8 | 4,9 | 14,2 | JUN | NW |
| 28,5 | 17 | 11,9 | 14,4 | 2,4 | 8,5 | 3,6 | 7,4 | 3,3 | 12,3 | 7,9 | 14,3 | 7,9 | 14,5 | 30,7 | 17,4 | 3,8 | 14,9 | JUL | NW |
| 31,9 | 16,6 | 13,3 | 14,3 | 2,8 | 10,5 | 2,9 | 6,4 | 4 | 11,3 | 5,8 | 13,7 | 4,8 | 12 | 29,8 | 17,2 | 4,7 | 14,6 | AGO | N |
| 24,8 | 13,5 | 8,8 | 12 | 3,5 | 9,6 | 4 | 7,2 | 6,4 | 12,4 | 9,4 | 13,4 | 9 | 11,7 | 25,4 | 14,4 | 8,7 | 11,8 | SET | NW |
| 20 | 10,7 | 16,8 | 10,7 | 4,2 | 7,9 | 6,3 | 7,2 | 11,1 | 13 | 8,9 | 11,5 | 10,1 | 11,8 | 15,5 | 13,2 | 7,1 | 10,9 | OUT | N |
| 22,2 | 10,6 | 10,4 | 12,3 | 7,1 | 9,5 | 5,9 | 10,8 | 10,5 | 15,5 | 8,6 | 11,7 | 12,1 | 11,9 | 16,2 | 12,4 | 7 | 11,3 | NOV | N |
| 28,6 | 10,5 | 15,1 | 11,5 | 6,5 | 9,4 | 3,8 | 9,6 | 6,5 | 14,3 | 6,9 | 12,1 | 10,3 | 11,6 | 15,8 | 12,2 | 6,5 | 11,6 | DEZ | N |
| 24,1 | 13,4 | 11,8 | 12,2 | 4,4 | 9,2 | 4,5 | 8,5 | 8,8 | 14,5 | 9,0 | 13,2 | 10,1 | 12,9 | 21,0 | 26,1 | 6,2 | 12,8 | Média | |

Anexo II.3 – Sacavém

A estação funciona desde Janeiro de 1943, nas coordenadas 38° 49' N e 9°05' O, ligeiramente mais a norte que as duas estações anteriores e com o posto de recolha a uma altura de 9 m acima do nível do mar.

O facto de esta ser uma estação com menor significado que as anteriores leva a que, nas Normais consultadas, faltassem valores para a humidade relativa às 15 h.

Após consulta das Normais Climatológicas 41-70 e 51-80 os dados recolhidos são apresentados no Quadro II.5.

Quadro II.5 – Dados climatéricos para estação de Sacavém.

| Sacavém | | | | | | | |
|------------------------|-----------------------|----------|-------------|---------------|-------------|-------------------|--------------|
| Temperatura média (°C) | Humidade relativa (%) | | | Insolação (h) | | Precipitação (mm) | |
| | 9h | 15h | 18h | Total | % | | |
| Mensal | | | | | | Total | |
| 10,6 | 88 | - | 82 | 123 | 41 | 109,4 | JAN |
| 12,1 | 84 | - | 77 | 139,7 | 47 | 109 | FEV |
| 12,7 | 79 | - | 74 | 185,3 | 51 | 68,1 | MAR |
| 14,8 | 76 | - | 72 | 208,9 | 55 | 50,1 | ABR |
| 16,3 | 74 | - | 66 | 273 | 62 | 42,3 | MAI |
| 19,7 | 73 | - | 66 | 298,5 | 70 | 19,5 | JUN |
| 22,2 | 72 | - | 63 | 308,7 | 74 | 4,9 | JUL |
| 22,5 | 73 | - | 63 | 321 | 80 | 12,7 | AGO |
| 21 | 78 | - | 70 | 239,5 | 67 | 17,6 | SET |
| 17,7 | 81 | - | 76 | 178,5 | 53 | 70,5 | OUT |
| 13,7 | 84 | - | 79 | 165,2 | 56 | 63,8 | NOV |
| 11 | 86 | - | 81 | 130,1 | 45 | 104,9 | DEZ |
| 16,2 | 79 | - | 72,4 | 214,3 | 58,4 | 56,1 | Média |
| - | 75,7 | | | 2571,4 | - | 672,8 | Ano |

De notar a diferença do valor ligeiramente mais alto da humidade relativa, quando comparado com os anteriores, e isso deve-se precisamente ao facto de faltar o registo da humidade relativa às 15 h.

No Quadro II.6, apresentam-se os valores para o parâmetro vento na estação de Sacavém.

Quadro II.6 – Valores do vento para a estação de Sacavém.

| Sacavém | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------|------------|-------------|------------|------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------------|----------|
| Vento | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Frequência do vento (%) e velocidade média (km/h) para cada rumo | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N | | NE | | E | | SE | | S | | SW | | W | | NW | | C | | Vel méd (km/h) | Direcção |
| 9,6 | 11,6 | 8,8 | 9,7 | 0,2 | 7 | 1,3 | 9,7 | 5,6 | 12,8 | 9,2 | 12,4 | 10,3 | 8,9 | 11,3 | 10,5 | 43,7 | 8,5 | JAN | NW |
| 14,3 | 12,3 | 12,3 | 10,2 | 2 | 14,2 | 2,3 | 15 | 5,3 | 11,5 | 14,1 | 13,4 | 11,1 | 11 | 14,6 | 11,5 | 24 | 10,2 | FEV | NW |
| 20,7 | 13,8 | 13,2 | 12 | 2,9 | 11,9 | 1,3 | 14,6 | 2,9 | 10,8 | 7,7 | 9 | 13 | 9,1 | 24,4 | 11,2 | 13,9 | 9,8 | MAR | NW |
| 19,4 | 15,9 | 10,4 | 13,1 | 4,3 | 9,6 | 3,4 | 8,5 | 3,8 | 13,5 | 4,9 | 11,5 | 15,9 | 11,1 | 27,3 | 13,4 | 10,6 | 10,4 | ABR | NW |
| 20,9 | 15 | 7,1 | 11,7 | 2 | 7,3 | 1,6 | 9,6 | 3,1 | 12,7 | 6,9 | 12,5 | 14,4 | 10,4 | 37,5 | 14,4 | 6,5 | 11,1 | MAI | NW |
| 19 | 15 | 4,4 | 12,4 | 4,6 | 7,4 | 5 | 6,2 | 2,9 | 13,3 | 7,4 | 11,3 | 10,8 | 11,5 | 37,7 | 14,7 | 8,2 | 11,6 | JUN | NW |
| 24,1 | 15,8 | 3,7 | 11,1 | 5 | 7 | 4,6 | 7,2 | 2,2 | 8 | 4,1 | 11,4 | 8 | 10,9 | 40,7 | 15,2 | 7,6 | 11,5 | JUL | NW |
| 27,6 | 15,2 | 4,7 | 12,8 | 5,6 | 6 | 3 | 6,6 | 0,8 | 11,6 | 3,2 | 12,5 | 8,5 | 11,5 | 40,6 | 15,1 | 6 | 11,9 | AGO | NW |
| 18,2 | 13,8 | 6,7 | 10,1 | 6,5 | 6,3 | 2 | 7,1 | 4,1 | 9,9 | 8,8 | 10,4 | 10,3 | 10,5 | 32,8 | 12,9 | 10,6 | 9,5 | SET | NW |
| 16,4 | 11,9 | 12,9 | 9,5 | 3,3 | 7,1 | 3,2 | 11,4 | 6,7 | 11,8 | 7,8 | 9,1 | 12 | 9 | 20 | 11,4 | 17,7 | 8,6 | OUT | NW |
| 18 | 10,1 | 14,4 | 10,2 | 1,6 | 9,1 | 1 | 10,7 | 4,2 | 12,5 | 4,9 | 9,5 | 9,7 | 7,8 | 16,6 | 10,6 | 29,6 | 8,3 | NOV | N |
| 13,7 | 9,3 | 13 | 9,3 | 1,2 | 13,9 | 1,5 | 15,3 | 3,8 | 14,5 | 8,2 | 12,3 | 7,7 | 9,3 | 11,4 | 9,5 | 39,5 | 8,8 | DEZ | N |
| 18,5 | 13,3 | 9,3 | 11,0 | 3,3 | 8,9 | 2,5 | 10,2 | 3,8 | 11,9 | 7,3 | 11,3 | 11,0 | 10,1 | 26,2 | 12,5 | 18,2 | 10,0 | Média | |

Anexo II-4 – Zona do Estuário do Tejo

Após se estudarem os valores para as três estações consideradas para o ambiente fluvial, no Quadro II.7, apresentam-se os valores adoptados como médias e mais relevantes nesta zona.

Quadro II.7 – Dados climatéricos para a zona do Estuário do Tejo.

| Estuário do Tejo | | | | | | | |
|-----------------------------------|----------------------------------|-------------|-------------|----------------------|-------------|------------------------------|--------------|
| Temperatura média (°C) | Humidade relativa (%) | | | Insolação (h) | | Precipitação (mm) | |
| | 9h | 15h | 18h | Total | % | | |
| Mensal | | | | | | Total | |
| 10,9 | 87 | 74 | 83 | 121,1 | 40,3 | 112,5 | JAN |
| 12,0 | 83 | 69 | 79 | 146,8 | 52,0 | 104,6 | FEV |
| 13,1 | 80 | 64 | 76 | 183,4 | 50,0 | 84,3 | MAR |
| 15,0 | 76 | 59 | 74 | 232,7 | 59,7 | 51,3 | ABR |
| 17,0 | 74 | 55 | 71 | 293,9 | 66,7 | 42,3 | MAI |
| 20,0 | 72 | 54 | 70 | 304,2 | 69,3 | 20,2 | JUN |
| 22,3 | 71 | 50 | 67 | 342,7 | 78,7 | 3,5 | JUL |
| 22,6 | 73 | 48 | 67 | 330,4 | 80,0 | 8,2 | AGO |
| 21,2 | 78 | 55 | 72 | 249,7 | 68,3 | 23,7 | SET |
| 18,1 | 81 | 61 | 76 | 199,9 | 58,3 | 73,5 | OUT |
| 13,9 | 83 | 68 | 80 | 154,7 | 51,7 | 83,2 | NOV |
| 11,3 | 85 | 73 | 81 | 132,1 | 45,3 | 101,1 | DEZ |
| 16,5 | 78,5 | 60,6 | 74,5 | 224,3 | 60,0 | 59,0 | Média |
| - | 71,2 | | | 2691,63 | - | 708,467 | Ano |

Quadro II.8 – Valores do vento para a zona do Estuário do Tejo.

| Estuário do Tejo | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------------------|-----------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|--------------|-----------|--|--|--|--|--|
| Vento | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Frequência do vento (%) e velocidade média (km/h) para cada rumo | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N | NE | E | SE | S | SW | W | NW | C | Vel méd (km/h) | Direcção | | | | | | | | | | | | | | |
| 15,0 | 9,3 | 12,1 | 8,6 | 5,4 | 7,7 | 4,2 | 8,0 | 9,1 | 12,7 | 10,8 | 10,9 | 8,9 | 9,8 | 14,8 | 9,1 | 19,7 | 9,1 | JAN | N | | | | | |
| 17,7 | 10,0 | 11,4 | 9,5 | 5,6 | 10,6 | 3,8 | 10,4 | 8,0 | 12,4 | 13,4 | 11,9 | 10,2 | 10,7 | 18,4 | 10,5 | 11,4 | 10,5 | FEV | NW | | | | | |
| 20,0 | 11,3 | 12,1 | 10,3 | 5,8 | 8,9 | 4,6 | 10,2 | 6,4 | 11,2 | 9,8 | 9,9 | 10,9 | 9,7 | 23,3 | 56,5 | 7,2 | 9,9 | MAR | NW | | | | | |
| 21,8 | 13,0 | 8,5 | 11,2 | 4,7 | 8,2 | 5,4 | 7,5 | 6,4 | 12,7 | 8,9 | 10,5 | 12,2 | 10,8 | 27,1 | 13,3 | 5,1 | 10,6 | ABR | NW | | | | | |
| 20,0 | 13,2 | 8,4 | 10,2 | 2,3 | 7,2 | 3,9 | 8,5 | 5,5 | 11,8 | 9,8 | 11,6 | 11,8 | 11,0 | 34,7 | 13,2 | 3,6 | 11,0 | MAI | NW | | | | | |
| 20,0 | 13,4 | 6,1 | 10,2 | 3,7 | 7,4 | 5,3 | 6,8 | 4,8 | 11,4 | 10,1 | 11,1 | 10,1 | 11,0 | 35,5 | 13,5 | 4,4 | 11,3 | JUN | NW | | | | | |
| 24,7 | 13,9 | 7,4 | 11,0 | 3,6 | 7,3 | 5,5 | 6,9 | 3,0 | 8,9 | 7,3 | 10,9 | 7,9 | 11,0 | 36,7 | 14,1 | 3,8 | 11,7 | JUL | NW | | | | | |
| 27,6 | 13,8 | 8,6 | 11,6 | 3,5 | 7,8 | 4,6 | 6,6 | 2,9 | 9,8 | 5,9 | 11,1 | 6,1 | 10,6 | 37,1 | 13,9 | 3,7 | 11,7 | AGO | NW | | | | | |
| 20,5 | 11,8 | 6,9 | 9,6 | 4,7 | 7,4 | 6,1 | 6,7 | 5,2 | 9,7 | 10,8 | 10,4 | 7,4 | 10,0 | 31,6 | 11,8 | 6,7 | 9,6 | SET | NW | | | | | |
| 17,9 | 9,9 | 12,7 | 8,6 | 4,4 | 6,9 | 6,5 | 8,3 | 8,0 | 10,8 | 10,1 | 9,2 | 10,5 | 9,1 | 21,0 | 10,6 | 8,8 | 8,8 | OUT | NW | | | | | |
| 20,0 | 8,9 | 13,1 | 9,4 | 6,0 | 8,2 | 4,8 | 8,9 | 6,2 | 12,1 | 7,1 | 9,6 | 9,1 | 8,5 | 20,9 | 9,7 | 12,9 | 8,9 | NOV | NW | | | | | |
| 20,8 | 8,6 | 14,9 | 8,9 | 6,8 | 9,7 | 4,1 | 10,3 | 5,7 | 12,4 | 8,0 | 11,0 | 7,3 | 9,2 | 15,3 | 9,5 | 17,1 | 9,3 | DEZ | N | | | | | |
| 20,5 | 11,4 | 10,2 | 9,9 | 4,7 | 8,1 | 4,9 | 8,3 | 5,9 | 11,3 | 9,3 | 10,7 | 9,4 | 10,1 | 26,4 | 15,5 | 8,7 | 10,2 | Média | | | | | | |

Anexo II.5 – Cabo Carvoeiro – Ambiente Marítimo

Funciona desde 1937 no farol, com observações as 7 h, 13 h e 18 h. Há valores das temperaturas extremas desde Março 1934, do vento e do número de dias desde Janeiro 1937, da PA e da Insolação desde Janeiro 1939 e da evaporação Janeiro 1951. Tem as coordenadas 39°21' N e 9°24' O, estando o posto de recolha 32 m acima do nível do mar.

Após consulta das Normais Climatológicas 41-70 e 51-80, os dados recolhidos são apresentados no Quadro II.9.

Quadro II.9 – Dados climatéricos para estação do Cabo Carvoeiro.

| Cabo Carvoeiro | | | | | | | |
|-------------------------------|------------------------------|-------------|-------------|------------------|-------------|---------------------|--------------|
| Temperatura média (°C) | Humidade relativa (%) | | | Insolação | | Precipitação | |
| | 9h | 15h | 18h | total (h) | % | Total (mm) | |
| 11,7 | 84 | 79 | 82 | 127,7 | 43 | 88,6 | JAN |
| 11,8 | 84 | 78 | 81 | 140,6 | 47 | 80,4 | FEV |
| 12,9 | 83 | 76 | 81 | 171,4 | 47 | 68,6 | MAR |
| 13,7 | 85 | 77 | 82 | 212,3 | 54 | 46,9 | ABR |
| 15,2 | 87 | 80 | 83 | 245,7 | 56 | 37,6 | MAI |
| 16,8 | 90 | 82 | 84 | 244,3 | 55 | 16,9 | JUN |
| 18 | 92 | 83 | 86 | 267 | 60 | 2,2 | JUL |
| 18,3 | 93 | 84 | 86 | 269,6 | 64 | 6,6 | AGO |
| 18,2 | 9 | 84 | 87 | 211,2 | 57 | 22,7 | SET |
| 16,8 | 87 | 79 | 85 | 186,6 | 55 | 60,4 | OUT |
| 14,1 | 83 | 76 | 81 | 146,8 | 50 | 78,6 | NOV |
| 12,1 | 82 | 77 | 81 | 134,9 | 47 | 81,7 | DEZ |
| 15,0 | 79,9 | 79,6 | 83,3 | 196,5 | 52,9 | 49,3 | Média |
| - | 80,9 | | | 2358,1 | - | 591,2 | Ano |

Relativamente ao vento este apresenta direcções e velocidades completamente diferentes do ambiente fluvial. Isto deve-se ao facto de se situar cerca de 100 km Norte do estuário do Tejo e de se tratar de uma zona marítima.

Por análise do parâmetro vento da estação do Cabo Carvoeiro, verifica-se que nos meses de verão a frequência do rumo N é em média de 57,4%, valor muito próximo dos 60% referidos por Castanho *et al.*, 1997.

Quadro II.10 – Valores do vento para a estação do Cabo Carvoeiro.

| Cabo Carvoeiro | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|----------------------|--------------|---|
| Vento | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Frequência do vento (%) e velocidade média (km/h) para cada rumo | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| N | | NE | | E | | SE | | S | | SW | | W | | NW | | C | Vel méd (km/h) | Direcção | |
| 13,5 | 22,3 | 11,3 | 15,4 | 10 | 14,3 | 19,2 | 19,3 | 20,5 | 20,6 | 6,6 | 17,3 | 13 | 17,3 | 5,2 | 22,7 | 0,7 | 19,5 | JAN | S |
| 17,6 | 20,7 | 10,6 | 17 | 8,6 | 15,1 | 14,9 | 20,1 | 20,5 | 21,8 | 6,7 | 20,2 | 13,5 | 20,2 | 7 | 22,9 | 0,6 | 20,6 | FEV | S |
| 27,5 | 20,4 | 9,6 | 16,7 | 7,1 | 16,4 | 11,3 | 19 | 16 | 19 | 7,3 | 18,2 | 12,2 | 18,2 | 8,5 | 18,1 | 0,5 | 19 | MAR | N |
| 40,7 | 21,8 | 15,7 | 17 | 4,9 | 15,4 | 4 | 16,2 | 9,3 | 18,8 | 5,3 | 15,9 | 11,8 | 15,9 | 7,7 | 15,4 | 0,6 | 19,2 | ABR | N |
| 49,8 | 20,1 | 11,3 | 18,6 | 2,3 | 12 | 2,3 | 15,1 | 9,8 | 17 | 6,5 | 12,3 | 9,7 | 12,3 | 8,1 | 13,7 | 0,2 | 18,6 | MAI | N |
| 53,9 | 19,1 | 11,2 | 17,4 | 1,5 | 11,6 | 1,6 | 12,2 | 9,9 | 13,5 | 5,3 | 10,2 | 8,9 | 10,2 | 6,9 | 10,5 | 0,8 | 16,7 | JUN | N |
| 60,9 | 18,3 | 14,5 | 18,4 | 0,8 | 10,2 | 1,2 | 8,1 | 6,4 | 10,7 | 3,2 | 8,3 | 4,7 | 8,3 | 8,2 | 10,3 | 0,1 | 17 | JUL | N |
| 57,3 | 17,9 | 18,3 | 16,8 | 1,3 | 10,4 | 1,5 | 10,4 | 7,8 | 10,8 | 2,4 | 8,7 | 4,7 | 8,7 | 5,4 | 9,6 | 1,3 | 16,5 | AGO | N |
| 39,9 | 16,4 | 17,4 | 14,8 | 2,5 | 8,6 | 3,4 | 11,6 | 18,3 | 12,6 | 5,4 | 10,9 | 6,4 | 10,9 | 5,7 | 10,5 | 1 | 14,7 | SET | N |
| 26,6 | 17,1 | 17,8 | 14,7 | 8 | 13,1 | 10,1 | 17,4 | 18,8 | 15,1 | 3,9 | 12,4 | 8,2 | 12,4 | 5,6 | 16,1 | 1 | 16,1 | OUT | N |
| 22,2 | 22,2 | 17,5 | 16,8 | 10,2 | 12,4 | 14,4 | 18,6 | 16,9 | 19,4 | 3,2 | 17,8 | 7,9 | 17,8 | 7,2 | 20,7 | 0,5 | 19,1 | NOV | N |
| 19,2 | 23,3 | 16 | 17 | 12,7 | 13,8 | 16,1 | 18,2 | 15,1 | 19,2 | 5,2 | 19,8 | 10,1 | 19,8 | 4,9 | 23,1 | 0,7 | 19,9 | DEZ | N |
| 35,8 | 20,0 | 14,3 | 16,7 | 5,8 | 12,8 | 8,3 | 15,5 | 14,1 | 16,5 | 5,1 | 14,3 | 9,3 | 14,3 | 6,7 | 16,1 | 0,7 | 18,1 | Média | |

Anexo III – Zonas de recolha e perfis de cloretos por cais

III.1 Cais da Matinha - MA

O Cais da Matinha situa-se na parte Oriente da cidade de Lisboa e data da década de 40. Nessa altura, o cais servia de apoio ao descarregamento de carvão para a antiga Fabrica de Gás da Matinha, sendo este transportado por meio de vagonetas (ainda visíveis ao longo da estrutura) sobre carris até ao edifício. De salientar ainda que a configuração actual do cais não é a inicial (como é possível verificar na Figura III.1), sendo que este levou obras de ampliação para fazer face ao nível do rio Tejo em maré vazia naquela zona.

Através da análise do arquivo do Porto de Lisboa, foi possível obter informações sobre o tipo de betão utilizado (ainda da antiga designação). No PC 1, foram utilizados 250 kg/m^3 de cimento (B250), sendo na PC 2 utilizados 225 kg/m^3 de cimento (B225). No entanto, dada a escassez de dados relativamente às restantes estruturas, optou-se por não considerar a sua influência na degradação do cais.

Os locais onde foram retiradas as amostras são ilustrados na Figura III.0.1.



Figura III.0.1 – Recolha de amostras no cais MA.

No Gráfico III.1, apresentam-se os perfis de cloretos para o cais da Matinha.

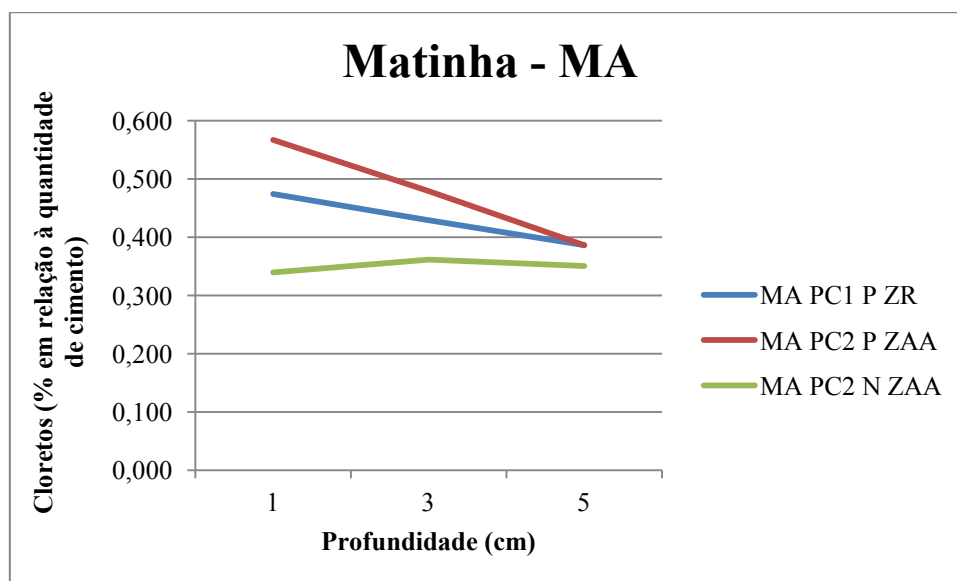


Gráfico III.1 – Perfis de cloretos para as amostras do cais da Matinha – MA.

III.2 Museu da Electricidade - ME

Não foi possível recolher muita informação sobre o cais, sabe-se apenas que data de 1940 e que servia de apoio à antiga Central do Tejo. Na Figura III.0.2, ilustra-se o local de recolha das amostras.

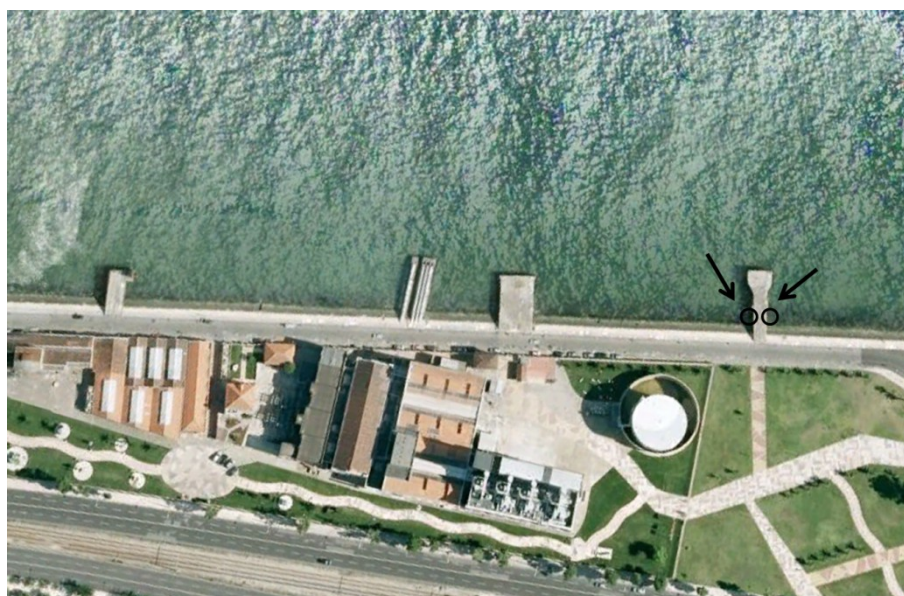


Figura III.0.2 – Recolha de amostras no cais ME.

No Gráfico III.2, apresentam-se os perfis de cloretos para o cais do Museu da Electricidade.

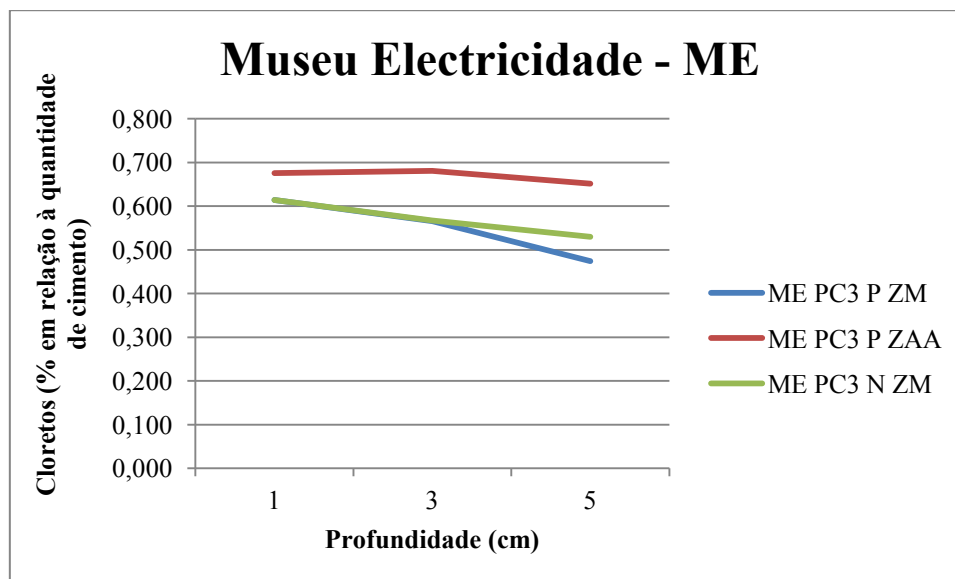


Gráfico III.2 – Perfis de cloretos para as amostras do cais do Museu da Electricidade – ME.

III.3 Porto de Peniche - PE

O porto de Peniche situa-se na parte Sul do istmo da península de Peniche a cerca de 100 km a Norte de Lisboa, e é um dos mais importantes no país, quer em termos de valor quer em termos de volume de pescado. O porto data de tempos históricos, embora só nos anos 50 é que se iniciaram as obras de maior vulto, vindo a assumir a sua configuração actual na década de 70 com a construção de importantes obras marítimas e portuárias.

A bacia portuária é protegida por dois molhes – o molhe W com cerca de 700 m de comprimento e o molhe E com cerca de 600 m – tendo a boca do porto cerca de 100 m e fundos operacionais entre as cotas (-5 metros) e (-8 metros).

Enquadradas nos dois grandes molhes de protecção foi analisada a degradação nas seguintes estruturas:

- 3 ponte cais de estacionamento de embarcações em vazio (1970);
- 2 pontes cais de descarga, com 100 m de extensão e 15 m de largura;
- 2 pontes cais de estacionamento, com 150 m de extensão e 5 m de largura;

Os locais onde foram retiradas as amostras são ilustrados na Figura III.0.3.



Figura III.0.3 - Recolha de amostras no cais PE.

No Gráfico III.3 apresentam-se os perfis de cloretos para o porto de Peniche.

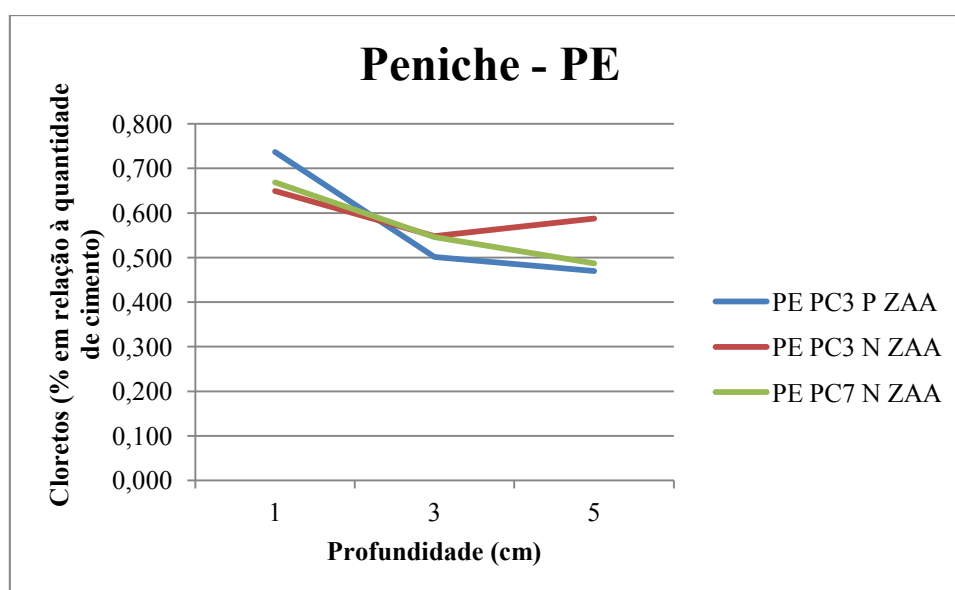


Gráfico III.3 – Perfis de cloretos para as amostras do porto da Peniche – PE.

III.4 Porto da Nazaré - NA

O porto da Nazaré é essencialmente um porto piscatório, ainda que disponha da valência de náutica de recreio. O porto data de 1980 e situa-se na parte Sul da enseada da Nazaré, sensivelmente a 20 milhas a nordeste do Cabo Carvoeiro.

A entrada do porto é constituída por barra protegida por dois molhes, o Norte com 250 metros e o Sul com 400 metros de comprimento. Os fundos operacionais do porto desenvolvem-se

entre a cota mínima de -5 metros e a cota máxima de -8 metros. O porto da Nazaré, dada a sua configuração e implantação, é considerado um dos portos mais abrigados da costa ocidental portuguesa.

Relativamente às infraestruturas do porto, foram estudados:

- 2 Pontes cais de estacionamento;
- Cais de descarga de pescado (lota).

Os locais onde foram retiradas as amostras são ilustrados na Figura III.0.4.



Figura III.0.4 – Recolha de amostras no cais NA.

No Gráfico III.4, apresentam-se os perfis de cloretos para o porto de Nazaré.

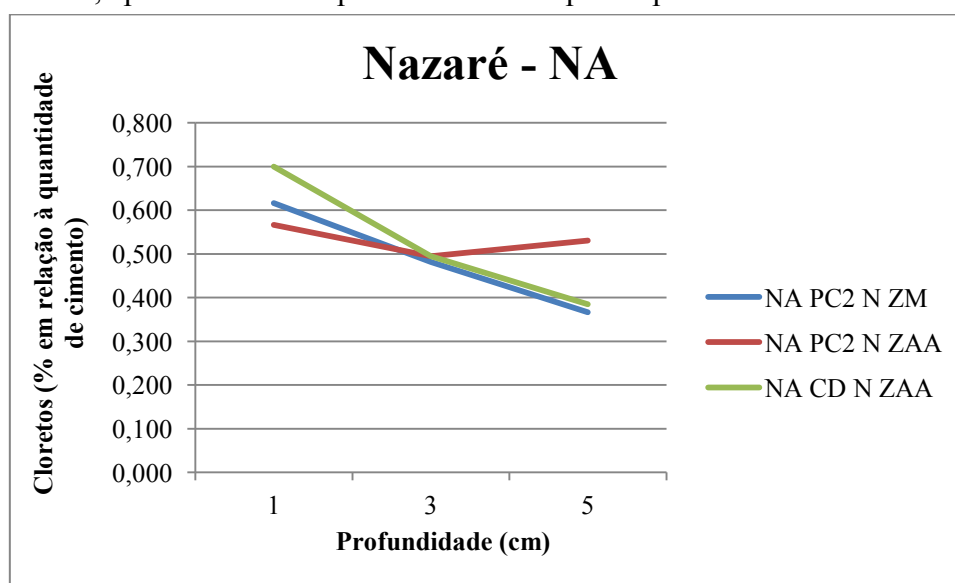


Gráfico III.4 – Perfis de cloretos para as amostras do porto da Nazaré – NA.