

COMPOSIÇÕES E COMPORTAMENTO DE BETÕES EM AMBIENTES MARÍTIMOS

ALBERTO JORGE NUNES MARTINS RAMALHO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professor Doutor Fernando Francisco Machado Veloso Gomes

JANEIRO DE 2019

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2018/2019

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2018/2019 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2019.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais e Irmão

“A persistência é o caminho do êxito”

Charles Chaplin

AGRADECIMENTOS

Concluída esta etapa, tão importante para um estudante desta prestigiada faculdade, resta tecer alguns agradecimentos a quem me acompanhou neste percurso académico.

O primeiro agradecimento é dirigido ao meu orientador Professor Doutor Fernando Francisco Machado Veloso Gomes, pelo seu tempo disponibilizado, pela enorme ajuda e dedicação para que pudesse desempenhar um bom trabalho. Agradeço ainda pela parte motivacional que desenvolveu em mim.

Aos meus pais e ao meu irmão João, as pessoas mais importantes da minha vida, apoiando-me sempre nos bons e maus momentos. Um exemplo de trabalho árduo e dedicação. Sempre depositaram em mim toda a sua força e esperança durante todas as etapas da minha vida.

Aos meus companheiros de curso, agradeço toda a motivação transmitida, pela enorme amizade e companheirismo ao longo de todos estes anos de faculdade.

À D. Esmeralda pelo carinho e dedicação que deposita em todos os alunos e em toda a secção de Hidráulica. Sem dúvida que o trabalho de secretariado fica muito mais fácil com o seu apoio.

À HydroStone e em particular ao engenheiro José Neves, por ter facultado todos os dados importantes relativamente à obra do esporão de Espinho, e por nos ter recebido muito bem no estaleiro da empresa na altura em que decorriam trabalhos de betonagem dos blocos a empregar na obra.

RESUMO

O aparecimento do betão com composições semelhantes às atuais, em meados do século XIX, veio influenciar fortemente a sociedade e a indústria da construção. A sua capacidade resistente, a sua produção relativamente simples, a possibilidade de se conseguir construir quase todas as geometrias imagináveis e o facto de existir um vasto enquadramento normativo fazem deste material um dos mais utilizados nos dias de hoje, pelo que um olhar à nossa volta permite comprovar a sua existência em quase todas as construções existentes.

Um dos grandes desafios da atualidade é garantir a sustentabilidade deste material e a sua durabilidade, que vai sendo conseguida com maior ou menor manutenção das estruturas onde é utilizado. Apesar do betão ser um material durável, porque consegue manter as suas características mecânicas durante várias décadas, está muitas vezes sujeito a ambientes mais agressivos que o tornam mais vulnerável, quanto mais não seja a nível de aspeto (fendilhação, delaminação, destacamento). Neste seguimento, a dificuldade atual é perspetivar esses fenómenos agressivos e conseguir modelos fiáveis que determinem a durabilidade das estruturas, até porque muitas das deficiências existentes ocorrem porque essas mesmas estruturas de betão incorporam armaduras de aço na sua construção que é bastante suscetível a ataques corrosivos, ou porque ainda dependem muito da mão humana.

Dada a sua grande utilização em quase todas as áreas, a construção de estruturas marítimas e portuárias em betão não é exceção, ainda para mais num país com uma linha de costa de cerca de 700 km. Construções como cais, quebramares, pontes-cais, pontões, esporões, edifícios de apoio marítimo são muitos dos exemplos onde se inclui o betão. Um dos aspetos que se deve ter presente é a agressividade do meio marítimo dada a presença de diversos agentes que influenciam a durabilidade do betão (sais na água do mar, variações dos níveis de água por ação das marés, variações de temperatura, reações químicas, ataques biológicos, ação mecânica associada à agitação marítima).

Uma vez expostas a esses ataques é de prever que tais estruturas exijam manutenção preventiva ou reativa para que possam cumprir o período de vida útil para o qual foram dimensionadas, garantindo condições de funcionalidade e segurança. Atualmente já são várias as técnicas que permitem solucionar determinados danos que as estruturas podem sofrer em ambientes mais agressivos.

O objetivo deste estudo é caracterizar o material betão, comprovar a sua vasta utilização em vários tipos de estruturas marítimas, bem como as condicionantes à sua durabilidade e abordar as técnicas existentes para reparação. Como caso de estudo surge a última intervenção que o esporão norte de Espinho sofreu, analisando a composição dos novos blocos de betão e os trabalhos previstos.

PALAVRAS-CHAVES: composições de betão, durabilidade em ambientes marítimos, tipos de estruturas marítimas em betão, reparações de estruturas em betão, esporão de Espinho

ABSTRACT

Since the appearance of the modern concrete in the middle of XIX century that the civilizations and the construction industry have been influenced by its use. The resistant properties, the facility of production, the possibility to combine a lot of different structural forms associated with proper legal norms make this material one of the most used nowadays.

One of the main challenges of the construction industry is guarantee the sustainability and durability of this material, which is reachable with some maintenance in the structures. Although the concrete is a durable material, because it keeps the strength properties during the life cycle, there are some environments more aggressive that influence its behavior which is expressed by some reactions of expansion or cracking. In this context, it is difficult to estimate these occurrences and define proper models to expect concrete's structure durability. It is important to note that most of the concrete structures include steel bars which is an extra source of damage caused by corrosion. Another reason it's the presence of human action in a lot of works with this material.

Among the large application of concrete in many areas of the civil engineering, its use at the coastal and port is not an exception, especially in Portugal, a country with 700 km of coastline. The type of constructions with concrete can be very different like quays, piers, groins, breakwaters but we can never forget the diversity of agents in coastal areas which have a lot of impact in the durability of these structures (salty water, tide oscillation, the scale of temperatures, chemical reactions, biological attacks, wave loads...). In consequence of the exposition at these attacks some maintenance is needed that can be preventive or reactive. Only with this is possible to ensure that the structures remain in good conditions of security to perform the expected life cycle. Actually, there are many solutions to repair the damages caused by these rough conditions of the maritime environment in the concrete structures.

The main goal of this document is describing the concrete and its properties as a construction material and include it in the maritime structures. The topic of durability will be also analyzed according to some European norms. The maintenance and repair of concrete elements will be also mentioned. Finally, the case study is based on the last rehabilitation of the Espinho groin which will be described the concrete mixture used in the blocks.

KEYWORDS: concrete, maritime structures, durability in marine environments, marine concrete rehabilitations, piers, Espinho groin

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO	19
1.1. ENQUADRAMENTO DA DISSERTAÇÃO	19
1.2. OBJETIVOS E ESTRATÉGIAS	19
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	19
2 A COMPOSIÇÃO DO BETÃO E CARATERIZAÇÃO DO AMBIENTE MARÍTIMO	21
2.1. ENQUADRAMENTO DO CAPÍTULO	21
2.2. CARATERIZAÇÃO DO AMBIENTE MARÍTIMO	21
2.2.1. ÁGUA DO MAR	21
2.2.2. TEMPERATURA	22
2.2.3. MARÉS E ALTURA DE ONDA	23
2.2.4. HUMIDADE RELATIVA E NEVOEIRO MARÍTIMO	25
2.2.5. VENTO E EXPOSIÇÃO SOLAR	26
2.3. BETÃO	26
2.3.1. HISTÓRIA.....	26
2.3.2. COMPOSIÇÃO E PROPRIEDADES	28
2.3.2.1. Cimentos	30
2.3.2.2. Reações de hidratação	30
2.3.2.3. Adições e Adjuvantes.....	31
2.3.2.4. Porosidade e Permeabilidade	31
2.3.2.5. Relação água-cimento	32
2.3.2.6. Recobrimento	33
2.3.2.7. Colocação, Compactação e Cura.....	34
2.3.2.8. Degradação do betão.....	35
2.3.2.9. Betões Especiais	48

3	DURABILIDADE E TIPOLOGIAS DE ESTRUTURAS MARÍTIMAS EM BETÃO.....	55
3.1.	ENQUADRAMENTO DO CAPÍTULO	55
3.2.	DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS MARÍTIMAS EM BETÃO.....	55
3.3.	MODELOS DE DURABILIDADE	62
3.3.1.	MODELO PROBABILÍSTICO	63
3.3.2.	LNEC E464 E LNEC E465	65
3.3.3.	MODEL CODE 2010	66
3.4.	TIPOS DE ESTRUTURAS MARÍTIMAS EM BETÃO.....	67
3.4.1.	CAIS	69
3.4.2.	QUEBRAMARES.....	73
3.4.3.	DIQUES.....	77
3.4.4.	ESTRUTURAS ADERENTES	78
3.4.5.	ESPORÕES	79
3.4.6.	MOLHES.....	80
3.4.7.	PONTÕES E PONTES CAIS	82
3.4.8.	ESTRUTURAS <i>BYPASS</i> DE AREIA	83
3.4.9.	EDIFÍCIOS.....	84
4	PREVENÇÃO DE DANOS E REPARAÇÕES DE ESTRUTURAS DE BETÃO EM AMBIENTE MARÍTIMO	85
4.1.	ENQUADRAMENTO DO CAPÍTULO	85
4.2.	GENERALIDADES	85
4.3.	NORMA EN 1504.....	86
4.4.	REPARAÇÕES DE ESTRUTURAS DE BETÃO EM AMBIENTE MARÍTIMO	89
4.4.1.	IMPREGNAÇÃO HIDROFÓBICA	89
4.4.2.	REVESTIMENTOS.....	90
4.4.3.	PREENCHIMENTO DE FISSURAS.....	90
4.4.4.	APLICAÇÃO DE MEMBRANAS	90
4.4.5.	REPERFILAMENTO COM BETÃO: MANUAL OU PROJETADO.....	91
4.4.6.	AUMENTO DO RECOBRIMENTO COM BETÃO	92
4.4.7.	SUBSTITUIÇÃO DO BETÃO CONTAMINADO	92
4.4.8.	REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA DO BETÃO CARBONATADO	92
4.4.9.	DESSALINIZAÇÃO	92
4.5.	BETONAGENS SUBMERSAS E CURA EM AMBIENTE MARÍTIMO	93

4.6.	ANÁLISE ECONÓMICA DE UMA ESTRUTURA DE BETÃO	93
------	---	----

5 CASO DE ESTUDO: REABILITAÇÃO DO ESPORÃO DE ESPINHO95

5.1.	PRINCIPAIS CARATERÍSTICAS	95
5.2.	DEFINIÇÃO ESTRUTURAL E JUSTIFICAÇÃO PARA A INTERVENÇÃO	96
5.3.	BLOCOS ANTIFER	99
5.3.1.	FICHA TÉCNICA DOS BLOCOS ANTIFER.....	101
5.4.	CÁLCULO ESTRUTURAL.....	102
5.5.	OPERAÇÕES PREVISTAS E EXECUTADAS.....	105
5.6.	COMPOSIÇÃO DO BETÃO DA ÚLTIMA REABILITAÇÃO	106
5.7.	COMPOSIÇÕES DE BETÕES DE EMPREITADAS ANTERIORES	107

6 CONCLUSÕES 109

6.1.	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	109
6.2.	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	110
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Distribuição média dos sais na água do Oceano Atlântico (Rodrigues citando Sousa Coutinho, 2011).	22
Figura 2.2 - Influência das diferentes zonas climáticas e de maré sobre o desempenho das estruturas marítimas (traduzido de Mehta, 1991)	23
Figura 2.3 - Condições de exposição e mecanismos de deterioração num ambiente marítimo (adaptado de Costa, 1997)	24
Figura 2.4 - Exemplo do “spray” formado devido à rebentação de uma onda (Lusa, Público: 1 de Janeiro de 2018, Manuel Araújo)	26
Figura 2.5 - Panteão de Roma (Wikipédia)	27
Figura 2.6 - Primeira ponte de betão armado em Portugal, Vale de Meões, 1904 (José Marques, Betão Liz)	28
Figura 2.7 - Enquadramento Normativo (Betão Liz, José Marques)	29
Figura 2.8 - Enquadramento Normativo dos constituintes do betão (Betão Liz, José Marques)	29
Figura 2.9 - Comparação da relação água-cimento com a profundidade de penetração (Collepari, 2008)	33
Figura 2.10 - Efeito do recobrimento na durabilidade da estrutura (Ferreira, 2006)	34
Figura 2.11 - Efeito da retração térmica em elemento de grandes dimensões (Costa, 1997).....	38
Figura 2.12 - Exemplo de reação expansiva por ataque de sulfato (Mapei, 2014).....	41
Figura 2.13 - Comparação de razões água-cimento com os coeficientes de carbonatação (Costa, 1997)	42
Figura 2.14 - Classes de resistência em função do índice de cloretos (Rui Azevedo, adaptado do EC2, 2010)	43
Figura 2.15 - a) Exemplo do gel formado na reação álcali-sílica; b) Exemplo de fendilhação causada por este ataque (Costa, 1997)	44
Figura 2.16 - Esquema representativo do processo eletroquímico de corrosão (Costa, 1997).....	45
Figura 2.17 – Exemplo do tipo de degradação causado pela corrosão (Ferreira, 2000)	46
Figura 2.18 - Esquema do mecanismo de corrosão (adaptado de Costa, IST).....	47
Figura 2.19 - Exemplo de corrosão uniforme (Tiago Santos, 2014).....	48
Figura 2.20 - Exemplo de betão pré-esforçado (www.engenhariacivil.com).....	48
Figura 2.21 - Exemplo de caixotões pré-fabricados para a construção de cais no porto de Malabo, Guiné Equatorial (Etermar, 2018)	51
Figura 2.22 – À esquerda: edifício de betão branco em Porto Alegre (Brasil) projetado pelo arquiteto Siza Vieira (www.tecnosilbr.com.br) ; À direita: edifício da Vodafone no Porto em betão à vista (Secil)	54
Figura 3.1 - Exemplo de diferentes classes de exposição numa estrutura marítima (Paulo Cachim, Universidade de Aveiro)	60
Figura 3.2 - Mecanismo de transporte de cloretos numa estrutura marítima (Rodrigues, 2011).....	61
Figura 3.3 - Exemplo de betão comportamento especificado (Cachim)	62
Figura 3.4 - Exemplo do desenvolvimento do estado limite de serviço de uma estrutura afetada por corrosão, modelo de Tuutti, 1999)	64
Figura 3.5 - Esquema representativo de estruturas do tipo cais (adaptado de Mehta, 1991)	67

Figura 3.6 - Esquema representativo de estruturas expostas à agitação marítima (fonte própria)	68
Figura 3.7 - Esquema representativo de estruturas do tipo pontes cais (fonte própria).....	68
Figura 3.8 - Esquema representativo de estruturas de defesa costeira (fonte própria)	69
Figura 3.9 - Esquema representativo de outros tipos de estruturas (adaptado de Lindley, 2019)	69
Figura 3.10 - Esquema de cais em blocos de betão do estilo gravítico (fonte própria).....	70
Figura 3.11 - Esquema de cais fundado em estacas (esq.) e do tipo caixão (dta.) (fonte própria)	70
Figura 3.12 - Construção de caixão para doca no porto de Cape Town (Mark Alexander, 2018).....	70
Figura 3.13 - Terraplino do terminal multiusos de Leixões (Irmãos Cavaco)	71
Figura 3.14 - Cais do porto de pesca da Afurada construído em blocos NOREF (Veloso Gomes)	71
Figura 3.15 - Cais fundado em estacas com viga de coroamento em betão armado (Veloso Gomes) 72	
Figura 3.16 - Estrutura flutuante para fabrico de caixotões (Etermar).....	73
Figura 3.17 - Representação dos vários tipos de conceção de quebramares (Hugo Lopes, FEUP)....	73
Figura 3.18 - Perfil transversal de um quebramar de talude (Hugo Lopes, FEUP).....	74
Figura 3.19 - Modelos de blocos de betão que constituem o manto resistente (Apontamentos de Trabalhos Marítimos 1 , FEUP)	75
Figura 3.20 - Quebramar de taludes constituído por blocos tetrápodes em betão, TPL de Leixões (APDL)	75
Figura 3.21 - Exemplo de quebramar flutuante de paramento vertical construído em betão (Nuno Sousa, 2011)	76
Figura 3.22 - Quebramar destacado da Aguda construído em betão ciclópico (Irmãos Cavaco)	77
Figura 3.23 - Representação de um dique com blocos de betão (Hillblock)	77
Figura 3.24 – Exemplo de um paredão, <i>seawall</i> (Seawall Doctors).....	78
Figura 3.25 - Exemplo de revestimento costeiro em blocos de betão (External Works).....	79
Figura 3.26 – Imagem representativa de um esporão em Luanda do campo de esporões da Ilha de Luanda, Angola (fonte própria).....	80
Figura 3.27 – Blocos cúbicos de 1 m ³ , constituintes do esporão da imagem anterior em Luanda, Angola (fonte própria)	80
Figura 3.28 - Molhes do Douro construídos por caixotões celulares em betão armado (Jornal de Notícias)	81
Figura 3.29 - Molhe norte de Aveiro construído em blocos de betão maciços do tipo <i>antifer</i> (Irmãos Cavaco).....	81
Figura 3.30 - Esquema de pontões flutuantes em betão (Lindley).....	82
Figura 3.31 - Ponte cais em betão (<i>pier</i>) situada em Cabo Verde (Somague).....	82
Figura 3.32 – Ponte cais (<i>pier</i>) construída em betão (Infracorr)	83
Figura 3.33 - Sistema <i>bypass</i> com bombas assentes nos pilares de uma estrutura de betão na Austrália (www.insidegoldcoast.com).....	83
Figura 3.34 - Lota da Póvoa de Varzim (Docapesca).....	84
Figura 4.1 - Exemplificação de danos e possível reparação num elemento de betão (Raupach e Buttner 2014).....	89
Figura 4.2 - Revestimento de betão arquitetónico (Secil).....	90
Figura 4.3 - Aplicação de tela asfáltica em cobertura de moradia (onossopalacio.blogspot.com)	91

Figura 4.4 - Aplicação de betão projetado nas docas da Lisnave (Apeb)	91
Figura 5.1 - Seção transversal tipo da cabeça (P2) do esporão norte antes das alterações introduzidas em 1997 (Veloso Gomes)	95
Figura 5.2 - Vista aérea do esporão com a cabeça parcialmente destruída e os tetrápodes prontos a serem depositados (Veloso Gomes).....	96
Figura 5.3 - Hipótese de mecanismo de colapso por erosão na risberma do pé de talude (Veloso Gomes)	97
Figura 5.4 - Hipótese de mecanismo de colapso por deslizamento de tetrápodes (Veloso Gomes)....	97
Figura 5.5 - Cabeça do talude parcialmente destruída à data de 2013 (Veloso Gomes).....	97
Figura 5.6 - Imagem representativa da destruição dos blocos e do seu completo desarranjo datada de 2015 (Francisco Piqueiro)	98
Figura 5.7 - Levantamento hidrográfico (com falha de dados) na área circundante à cabeça do esporão (Nov. 2016 pela empresa LHT, sistema de coordenadas Hayford Gauss datum Lx, cotas referentes ao ZH, 2m abaixo do NM Cascais), (Veloso Gomes, 2016)	99
Figura 5.8 - Exemplo de blocos antifer recém betonados (Abril de 2018, fonte própria)	100
Figura 5.9 - Descobragem dos blocos (Abril de 2018, fonte própria).....	100
Figura 5.10 – Cortes esquemáticos da geometria dos blocos cúbicos do tipo “antifer” (Veloso Gomes, 2016)	101
Figura 5.11 - Esquema representativo da reconstrução da cabeça do esporão (Veloso-Gomes 2016)	102
Figura 5.12 - Perfil tipo da rotação da cabeça; duas fiadas de cubos antifer de 40 tf, com talude de cotangente 2/1; Superestrutura com mais quatro cubos no alinhamento da diretriz da plataforma existente, à cota + 8 ZH; (quadrículas de 1m de largura) (Veloso Gomes, 2016)	104
Figura 5.13 - Decorrer das obras com remoção de alguns tetrápodes (Setembro de 2018, fonte própria)	105

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Influência da humidade relativa no risco de corrosão (adaptado de Ferreira, 2000).....	25
Quadro 2.2- Influência da relação água-cimento com a capilaridade (Thaulow, 2007)	33
Quadro 2.3 - Valores de recobrimento a adotar de acordo com as classes de exposição (Eurocódigo 2, 2010)	34
Quadro 2.4 – Fatores e processos de degradação mecânicos, biológicos e químicos (Ferreira, 2000)	36
Quadro 2.5 - Fatores e processos de degradação físicos e eletromagnéticos (Ferreira, 2000).....	36
Quadro 2.6 - Resumo das condições necessárias para ocorrência de corrosão (Ferreira, 2006).....	46
Quadro 2.7 – Comparação de preços de 3 soluções (duas pré-fabricadas e uma “in situ”) para uma passagem inferior de 3 vãos (Filipe Saraiva, IST, 2012)	50
Quadro 3.1 - Quadro representativo das classes sem risco de corrosão ou ataque (Norma NP 206-1 2007)	57
Quadro 3.2 - Quadro representativo das classes em risco de corrosão por carbonatação (Norma NP 206-1 2007)	57
Quadro 3.3 - Quadro representativo das classes em risco de corrosão por cloretos não oriundos da água do mar (Norma NP 206-1 2007).....	58
Quadro 3.4 - Quadro representativo das classes em risco de corrosão por cloretos presentes na água do mar (Norma NP 206-1 2007)	58
.....	59
Quadro 3.5 - Quadro representativo das classes em risco de ataque gelo/degelo com ou sem produtos descongelantes (Norma NP 206-1 2007).....	59
Quadro 3.6 - Quadro representativo das classes em risco de ataque químico (Norma NP 206-1 2007)	59
Quadro 3.7 - Quadro informativo do limite máximo de cloretos (adaptado de NP 206-1 2007)	61
Quadro 4.1 - Métodos e princípios de reparação de estruturas de betão armado (NP EN 1504)	88
Quadro 5.1 - Altura de onda em função da cota do fundo	102
Quadro 5.2 - Valores de Kd (adaptado de Coastal Engineering Manual, 2006)	103
Quadro 5.3 - Diferentes cenários para obtenção do peso dos blocos de acordo com a formulação de Hudson (Veloso Gomes, 2016)	104
Quadro 5.4 - Composição de betão utilizada na última reparação de 2018 nos blocos antifer (HydroStone)	106
Quadro 5.5 - Composições de betão ensaiadas para a reabilitação dos blocos tetrápodes (Irmãos Cavaco, 2009)	107

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

A.C. – antes de Cristo

a/c – água cimento

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

C – concentração de cloretos

°C – graus Celsius

CaCl₂ – cloreto de cálcio

Ca(HCO₃)₂ – bicarbonato de cálcio

Ca(OH)₂ – hidróxido de cálcio

CaSO₄ – sulfato de cálcio

Cm – centímetros

CO₂ – dióxido de carbono

D – coeficiente de difusão

D.C. – depois de Cristo

DEF – formação de etringite retardada

Etc. – et cetera

fib - Fédération internationale du béton

FRP – polímeros reforçados com fibras

g/l – gramas por litro

HR – humidade relativa

KCl – cloreto de potássio

kg/m³ – quilograma por metro cúbico

kN – quilonewton

K₂SO₄ – sulfato de potássio

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

m – metros

MgCl₂ – cloreto de magnésio

MgSO₄ – sulfato de magnésio

mm – milímetros

MPa - Megapascal

m/s – metros por segundo

NaCl – cloreto de sódio

NP EN – Norma Portuguesa (europeia)

Tf – toneladas força

TOT – todo o tamanho

TPL – terminal petrolífero de Leixões

ZH – zero hidrográfico

1 INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DA DISSERTAÇÃO

Sendo o betão um dos materiais mais utilizados na construção fica associado ao desenvolvimento das civilizações. O facto de poder ser empregue em todas as áreas de engenharia civil dá-lhe ainda mais projeção, não sendo exceção a engenharia marítima e portuária onde se encontram obras de grandes dimensões e relevância construídas com este material. O facto da especialidade de Hidráulica da FEUP não ter muita informação atualizada sobre estruturas de betão traz um sentido de oportunidade para o desenvolvimento desta dissertação, e em particular para o caso de estudo.

1.2. OBJETIVOS E ESTRATÉGIAS

Os objetivos principais desta dissertação passam pela definição e caracterização do betão e do meio marítimo, demonstração de vários tipos de estruturas marítimas construídas em betão, descrição dos principais métodos de reparação e por último a apresentação da composição dos blocos de betão utilizados na última reparação que o esporão norte de Espinho sofreu.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação divide-se em cinco capítulos:

- **No capítulo 1** é feita uma introdução do trabalho. Apresenta-se o seu objeto de estudo e a sua justificação, os objetivos do trabalho e a respetiva organização em capítulos.
- **No capítulo 2** pretende-se caracterizar o betão como material construtivo e a agressividade do meio marítimo (água do mar, temperatura, humidade, agitação marítima, etc.) onde as estruturas podem ser inseridas. Para tal procede-se a um pequeno enquadramento histórico, descrevem-se os principais componentes da mistura, propriedades e reações com o meio marítimo devido a possíveis ataques que o betão possa ser alvo.
- **No capítulo 3** são apresentadas condicionantes à durabilidade das estruturas e apresentam-se possíveis modelos que estimem essa mesma durabilidade. Numa segunda parte descrevem-se os principais tipos de estruturas marítimas construídas em betão.
- **No capítulo 4** descrevem-se os principais meios e técnicas de reparação às estruturas deterioradas com um suporte normativo.
- **No capítulo 5**, como caso de estudo refere-se a última intervenção na cabeça do esporão de Espinho onde se descrevem os principais trabalhos realizados, modos de dimensionamento e composição dos novos blocos.
- **No capítulo 6**, são expostas as conclusões retiradas de todo este trabalho.

2

A COMPOSIÇÃO DO BETÃO E CARATERIZAÇÃO DO AMBIENTE MARÍTIMO

2.1. ENQUADRAMENTO DO CAPÍTULO

Neste capítulo começa-se por caracterizar o ambiente marítimo, a diversidade de agentes aí presentes e quais as implicações que estes trazem às estruturas marítimas de betão.

Em seguida descreve-se o betão como material construtivo, abordando um pouco da sua história, principais composições, propriedades, processos de cura, aplicações, ataques a que está sujeito e alguns betões especiais.

2.2. CARATERIZAÇÃO DO AMBIENTE MARÍTIMO

A implementação de estruturas de betão em locais muito próximos da costa requer um cuidado diferente em comparação com outras localizações. Tal facto deve-se à agressividade que o ambiente marítimo impõe ao betão e ao aço, materiais que compõem a maior parte das estruturas da atualidade e que muitas vezes não cumprem o período de vida útil para o qual foram dimensionadas. São diversos agentes de natureza física, química e biológica que quando combinados se tornam um fator de risco para o betão, o qual pode ser atenuado se forem realizadas periodicamente ações de manutenção nas estruturas.

O ambiente marítimo pode ser caracterizado por:

- Composição da água do mar;
- Temperatura;
- Marés e altura das ondas;
- Humidade relativa e nevoeiro marítimo;
- Vento e Exposição solar;

2.2.1. ÁGUA DO MAR

De todos os agentes apresentados anteriormente, a água do mar poderá ser considerada um agente muito agressivo pois lá se encontram quase todos os elementos presentes na tabela periódica.

A maioria do material dissolvido na água do mar é constituída por sais inorgânicos, dos quais se destacam o cloreto de sódio (NaCl), cloreto de magnésio (MgCl₂), sulfato de magnésio (MgSO₄), sulfato

de cálcio (CaSO_4), cloreto de cálcio (CaCl_2), cloreto de potássio (KCl), sulfato de potássio (K_2SO_4) e bicarbonato de cálcio ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) como se mostra na Figura 2.1.

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

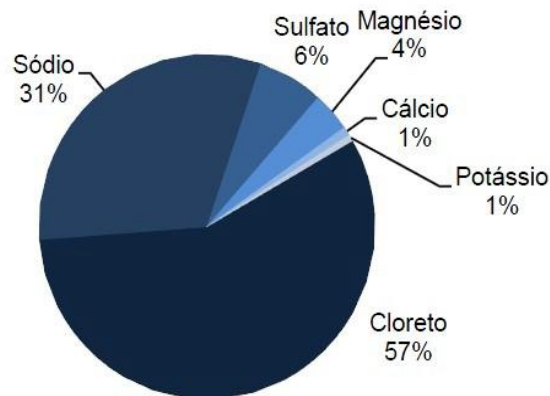


Figura 2.1 - Distribuição média dos sais na água do Oceano Atlântico (Rodrigues citando Sousa Coutinho, 2011).

Segundo Serra (2012), de todos os elementos presentes, os sais de magnésio revelam-se os mais perigosos para os produtos hidratados da pasta de cimento enquanto os cloretos são os agressivos para a corrosão de armaduras. Para além destes elementos também se pode encontrar gases dissolvidos e organismos marinhos capazes de produzir ácidos na água do mar, alterando o seu Ph e que por sua vez destroem a pasta de cimento.

2.2.2. TEMPERATURA

De acordo com Mehta (1991), a temperatura assume grande importância no meio pois o calor acelera as reações químicas, uma vez que facilita a mobilidade e penetração dos iões e moléculas no interior do betão. No entanto a agressividade provocada pelos sulfatos constitui uma exceção a esta regra, funcionando no processo inverso, pois a formação de etringite é máxima para 0°C e decresce até se anular a 80°C . Com isto é possível afirmar que a temperatura assume um papel duplo pois o seu aumento facilita o transporte de substâncias como cloretos, agressivos para as armaduras e, por outro lado, a sua diminuição origina condensações que podem levar a aumentos significativos do teor de humidade.

Também as constantes variações de temperatura provocam no betão diferentes ciclos de expansão e contração que lhe conferem deformações restringidas. A combinação das diferentes temperaturas com a água que circunda o betão provocam-lhe efeitos que devem ser previstos. Por exemplo, baixas temperaturas associadas à água do mar podem originar a formação de gelo que, por sua vez causam um processo físico de abrasão e conseqüente destacamento ou fendilhação do betão.

Verifica-se assim, que a relação da temperatura com a água e as diferentes zonas onde atuam têm diferentes impactos no betão não só na fase de exploração como também na fase de betonagem. Ou seja, a influência da subida e descida da maré, as zonas imersas, emersas ou de salpicos apresentam diferentes respostas a estes ciclos como se irá explicar mais à frente, deixando desde já o exemplo de que a temperatura da água perto da superfície varia entre um mínimo de -2°C (ponto de congelação da água) e um máximo de 30°C . A temperatura decresce rapidamente à medida que a profundidade aumenta, atingindo um valor estável de cerca de 2 a 5°C a profundidades entre os 100 e os 1000 m.

As condições de temperatura em ambientes marítimos podem ser divididas em quatro níveis distintos de acordo com a Figura 2.2:

- Frio, com temperaturas de congelamento da água;
- Temperado, com temperaturas anuais médias na volta dos 10-20 °C, chuvas moderadas e raramente com temperaturas de congelamento da água;
- Quente e seco, como os climas dos desertos com temperaturas de verão superiores a 45°C e pouca chuva;
- Quente e húmido, como os climas tropicais com temperaturas médias anuais não superiores a 30°C.

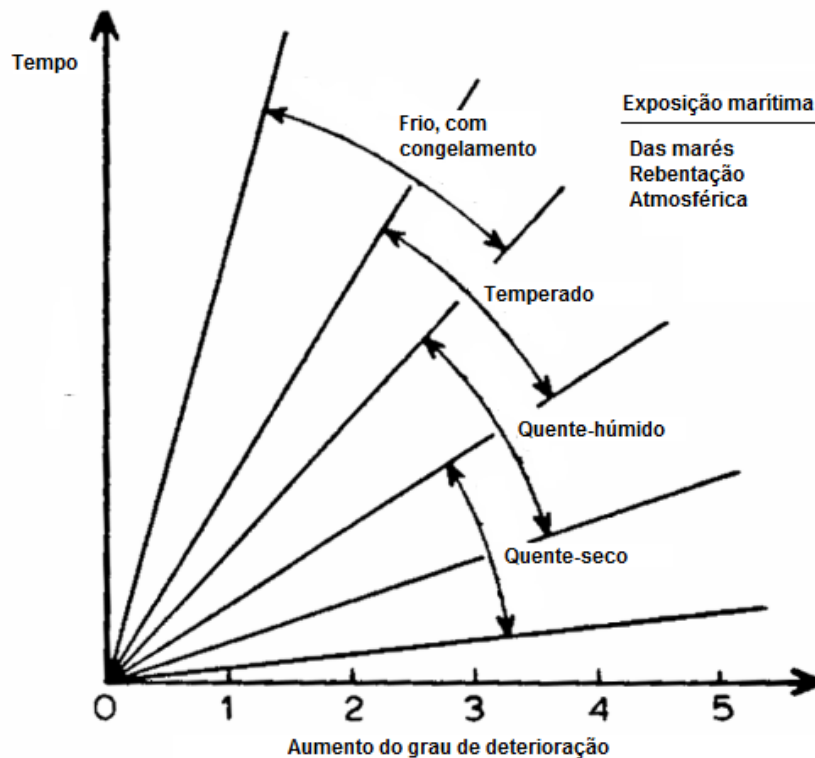


Figura 2.2 - Influência das diferentes zonas climáticas e de maré sobre o desempenho das estruturas marítimas (traduzido de Mehta, 1991)

2.2.3. MARÉS E ALTURA DE ONDA

As oscilações da maré ocorrem devido à força da gravidade entre a Lua, o Sol e a Terra que atrai a massa de água e a faz oscilar em função da localização relativa dos 3 astros. Apesar de possuir uma massa muito inferior à do Sol, a Lua exerce uma influência sobre as marés bastante superior, por se encontrar mais próxima da Terra. Existem ainda outros fatores não astronómicos que também influenciam o nível da maré, como por exemplo os ventos, agitação marítima e a pressão atmosférica, sendo este último mais determinante na medida em que baixas pressões sobem o nível médio das águas do mar e altas pressões funcionam de forma inversa.

Assim, esta variação das marés irá causar numa estrutura portuária (duas vezes ao dia) diferentes zonas de ação que quando relacionada com os efeitos da temperatura do ar e água do mar originam ciclos de molhagem e secagem, aquecimento e arrefecimento ou até congelação e descongelação. Percebe-se assim que estes fenómenos naturais trazem diferentes mecanismos de deterioração e diferentes efeitos que se explicam na Figura 2.3.

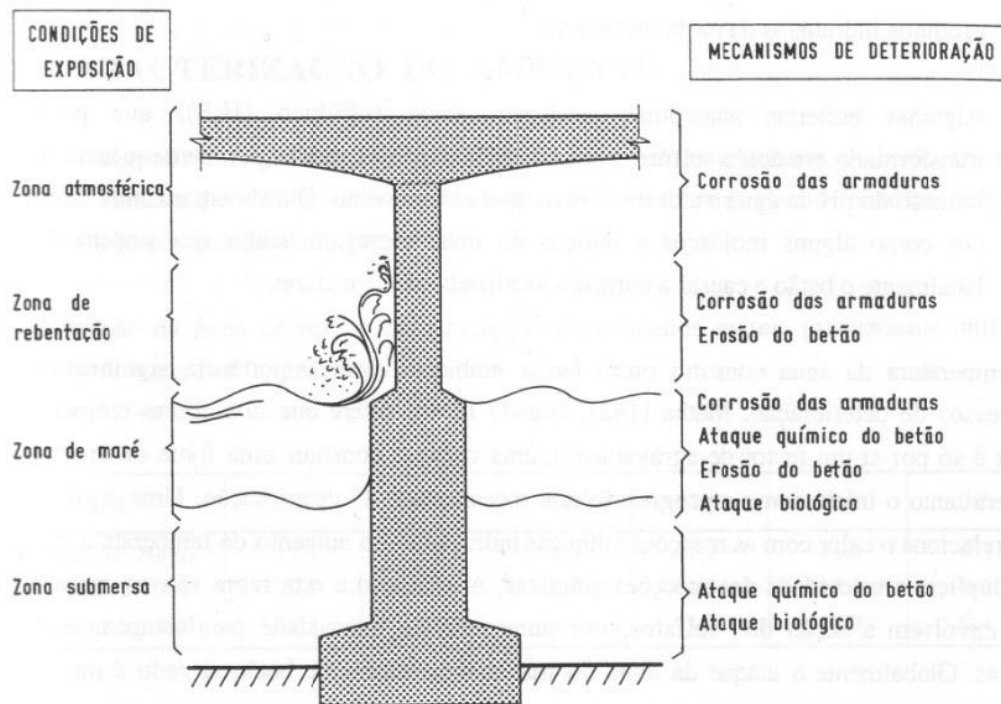


Figura 2.3 - Condições de exposição e mecanismos de deterioração num ambiente marítimo (adaptado de Costa, 1997)

No caso da zona atmosférica, considera-se que não existe contato direto com a água do mar e aparecem apenas salpicos de água do mar que são transportados pelo vento. Estes salpicos incorporam os cloretos que são os agentes mais agressivos para a corrosão das armaduras. De acordo com Serra (2012) sabe-se que no betão podem ocorrer fenómenos de carbonatação que quando combinados com a corrosão funcionam como catalisadores da mesma. Uma vez que os sais são transportados pelo vento, percebe-se que quanto mais afastadas do mar estão as estruturas, menos estão sujeitas a este fenómeno, que depende da intensidade de sais presentes na água, direção e velocidade do vento.

Numa zona mais abaixo denominada zona de rebentação, a estrutura fica sujeita a ciclos de secagem e molhagem que favorece o desenvolvimento de mecanismos de corrosão devido ao gradiente de temperatura e humidade constantes. Costa (1997) afirma que se nesta zona também ocorrer o transporte de material sólido, o betão ficará sujeito a um processo de erosão que faz diminuir o recobrimento.

Na zona de maré a estrutura fica sujeita aos ciclos de preia-mar e baixa-mar pelo que ocorre igualmente o ciclo de molhagem e secagem com a particularidade que o tempo de molhagem é maior e por isso o betão fica submerso durante várias horas. Este facto, faz com que o betão esteja mais vulnerável a ataques químicos e biológicos, mas atenua a corrosão nas armaduras.

Por último, na zona submersa o betão encontra-se saturado, com ausência de oxigénio, pelo que se despreza o fenómeno de corrosão apesar da elevada presença de cloretos. De acordo com Costa e Appleton (2012), poderá ocorrer corrosão negra, mas que não se revela agressiva pois não se verificam reacções expansivas e de fendilhação no betão. O facto de estar submerso torna o betão mais suscetível a ataques químicos por iões de sulfato e magnésio, bem como a ataques biológicos pela diversidade de microrganismos presentes na água do mar.

Depois de se analisar a influência das marés, resta a influência das ondas. A maior parte das ondas marítimas são consideradas ondas superficiais e progressivas. Superficiais, por se deslocarem ao longo

da superfície marítima, superfície essa que separa o meio atmosférico do meio hídrico e, progressivas por se moverem na direção da superfície terrestre. As ondas mais energéticas são em geral originadas pelo vento pelo que as alturas das ondas dependem diretamente da velocidade do vento, do comprimento (Fetch) de uma área do plano de água sobre o qual o vento atua numa direção de propagação em estudo (zona de geração) e do tempo de atuação do vento. Devido ao facto de as ondas transportarem energia, este fator assume especial importância quando dissipam essa energia em estruturas portuárias, como quebramares, cais, etc. porque desgastam o betão por processos abrasivos ou erosivos. Existem ainda ondas geradas por fenómenos tectónicos (maremotos) e por navios em movimento (esteira).

2.2.4. HUMIDADE RELATIVA E NEVOEIRO MARÍTIMO

Segundo Rodrigues (2011), um dos principais fatores que afetam 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, afetando a degradação química e física do betão. A humidade relativa controla ainda a resistividade e acesso a oxigénio no betão. O Quadro 2.1 relaciona a percentagem de HR com o risco de corrosão.

Humidade Relativa	Observações	Risco de Corrosão
100% (Betão Saturado)	Poros totalmente preenchido por solução hidróxido de cálcio que impedem o acesso de oxigénio	Sem Risco
90% a 95%	Poros preenchidos com solução, pela qual o oxigénio deve circular até às armaduras	Risco médio a baixo
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

Quadro 2.1 - Influência da humidade relativa no risco de corrosão (adaptado de Ferreira, 2000)

Já o nevoeiro marítimo forma-se quando massas de ar quente oriundas do interior se deslocam em direção à costa ou, quando massas de ar frio se deslocam em direção a ambientes mais quentes e húmidos como por exemplo a água do mar. Daqui resulta o transporte de gotículas de água do mar dissimuladas no efeito “spray”.

Mehta (1991) defende que este mesmo “spray” também pode ser formado aquando do rebentamento de ondas na linha de costa ou contra estruturas pelo que a água do mar é lançada para o ar e transportada pelo vento, tal como se mostra na Figura 2.4. Quanto mais forte se fizer sentir o vento maiores serão as distâncias percorridas por estas gotículas carregadas de salinidade que como se sabe representam perigo para estruturas armadas.



Figura 2.4 - Exemplo do “spray” formado devido à rebentação de uma onda (Lusa, Público: 1 de Janeiro de 2018, Manuel Araújo)

2.2.5. VENTO E EXPOSIÇÃO SOLAR

Tendo em conta o que já foi referido anteriormente, percebe-se que o vento assume um papel determinante no transporte de substâncias nocivas (sais) às estruturas marítimas e funciona como catalisador nos ciclos de molhagem e secagem. Também a velocidade e intensidade com que se manifesta são variáveis a considerar no efeito de penetração de agentes exteriores nessas mesmas estruturas. A orientação com que sopra é outro fator que influencia a penetração de substâncias agressivas, por exemplo, zonas mais protegidas apresentam índices de penetração mais elevados quando comparadas com zonas mais expostas, pois estas últimas também estão sujeitas a águas de chuva que as tornam mais lavadas apesar de apresentarem níveis de cloretos mais elevados.

Sobre a exposição solar e o impacto direto na degradação de estruturas marítimas, não existe grande informação que o comprove, embora se saiba que a incidência solar causa a degradação de certos materiais.

2.3. BETÃO

Tal como foi explicado anteriormente, neste subcapítulo inicia-se a abordagem ao betão como material tocando em aspetos como história, composição, propriedades, cura e aplicação, betões especiais, etc.

2.3.1. HISTÓRIA

Desde a era dos egípcios (3000 A.C.) que se usam misturas de materiais para construção. Nesse tempo misturava-se barro e palha para formar tijolo e também gesso com cal para formar argamassas. No entanto, foi na era dos romanos que o “betão” assumiu grande importância dando origem a obras de grande valor patrimonial como templos, pontes, aquedutos, alguns dos quais chegaram até aos nossos dias como o Panteão de Roma, construído no ano 127 D.C. (Figura 2.5). Posteriormente, o betão entrou um pouco em desuso, sendo usado essencialmente para fundações e no interior de paredes de alvenaria.



Figura 2.5 - Panteão de Roma (Wikipédia)

De acordo com Appleton (1997), foi em 1824 que Joseph Aspdin, em Inglaterra, inventou o cimento hidráulico Portland, queimando pedras calcárias com argilas finamente moídas num forno de cal. É a partir daqui que se dá o grande desenvolvimento e aplicação do betão nas construções. Em Portugal, a indústria de cimento inicia-se em 1894 com a fábrica de cimento Tejo em Alhandra.

As primeiras referências ao betão armado, surgem em 1848 pela mão de Joseph Louis Lambot, o qual criou uma embarcação de betão armado (ferrocimento) para ser apresentada em exposição em Paris.

O princípio do século XX é caracterizado por um desenvolvimento extraordinário na compreensão do funcionamento do betão armado e na sua utilização. Esse desenvolvimento está associado à realização de numerosas patentes onde se indicam as bases de cálculo e as disposições de armaduras adotadas para diversos elementos estruturais.

Na primeira metade desse século muitas são as realizações em betão armado em Portugal. A primeira obra deste tipo terá sido uma ponte em Vale Meões, datada de 1904, representada na Figura 2.6. Destacam-se o Canal do Tejo (executado de 1932 a 1940 e que envolveu a realização de túneis, pontes canal e tubagens de 2.5 m de diâmetro, tendo sido utilizada a vibração mecânica pela primeira vez no nosso país), numerosas pontes, o Viaduto Duarte Pacheco em Lisboa (concluído em 1944 com um desenvolvimento total de 505 m tendo o arco central um vão de 91.97 m) e edifícios de que se salienta o conjunto dos edifícios do IST (1936).

Durante a 2ª Grande Guerra há a referir, a título de curiosidade, a realização dos caixões de betão com 62 m x 17 m em planta que foram transportados para a Normandia e constituíram um porto artificial de apoio ao desembarque dos aliados em 1944.

Após a 2ª Grande Guerra assiste-se à afirmação das grandes possibilidades do betão armado como material estrutural, à exploração do betão aparente como solução arquitetónica e ao grande desenvolvimento do betão armado pré-esforçado.

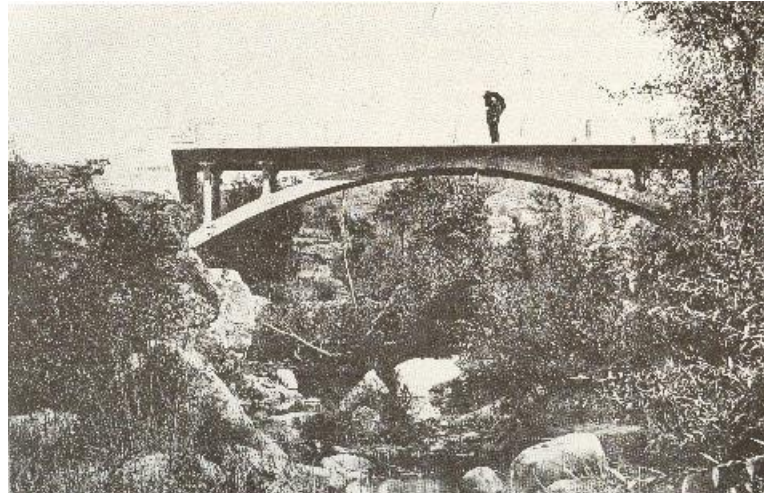


Figura 2.6 - Primeira ponte de betão armado em Portugal, Vale de Meões, 1904 (José Marques, Betão Liz)

2.3.2. COMPOSIÇÃO E PROPRIEDADES

Segundo a norma europeia NP EN 206-1 2007, o betão é um material formado pela mistura de cimento, agregados grossos e finos e água, com ou sem a incorporação de adjuvantes e adições, que desenvolve as suas propriedades por hidratação do cimento.

A seleção dos constituintes acima referidos, bem como a sua qualidade interferem diretamente na durabilidade do betão como produto final. No entanto, também se devem ter cuidados no que se refere à colocação, compactação e cura que se irão analisar mais à frente.

Na constituição do betão, sabe-se que a água da amassadura deverá obedecer a alguns cuidados, como por exemplo, livre de cloretos (presentes na água do mar) caso o objetivo seja um betão armado. Também a presença de óleos minerais em elevada quantidade irá reduzir resistência mecânica do betão. Regra geral, a maior parte das águas municipais são apropriadas para a produção de betão.

No caso dos agregados, estes terão impacto na porosidade e peso volúmico do betão, no entanto, será o cimento que irá conferir a maior parte das propriedades do betão e como tal será o mais aprofundado nos parágrafos seguintes. As Figuras 2.7 e 2.8 esquematizam as normas disponíveis referentes a ensaios e características dos constituintes e a projetos de estruturas de betão. Importa referir que se encontra em processo de aprovação a nova norma NP EN 206 2013+A1:2017 referente a especificações, desempenho, produção e conformidades do betão.

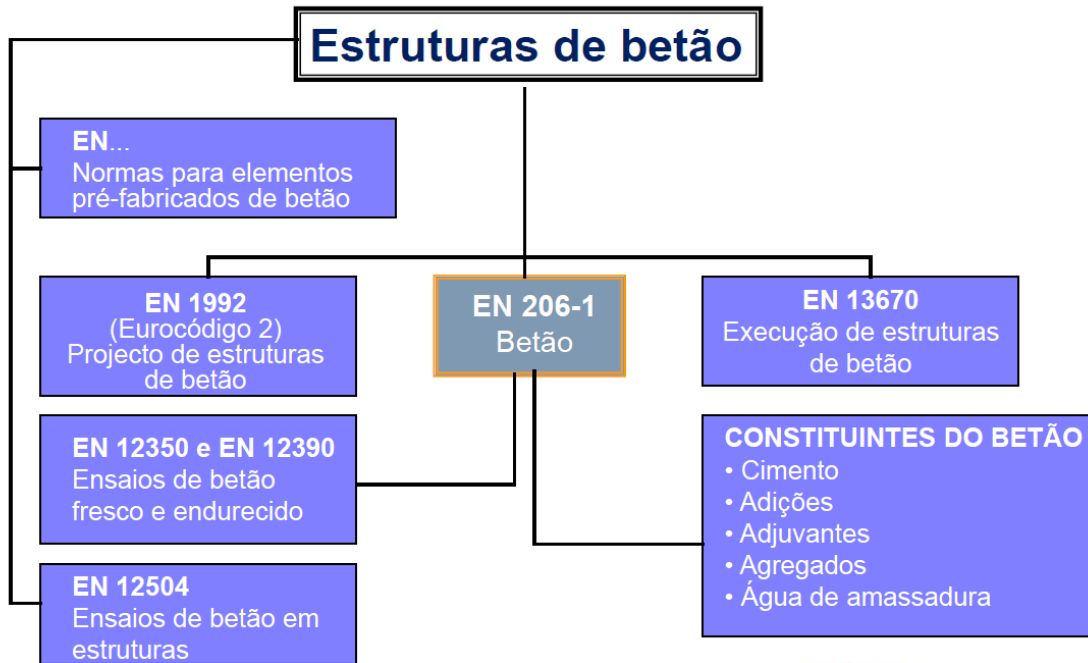


Figura 2.7 - Enquadramento Normativo (Betão Liz, José Marques)

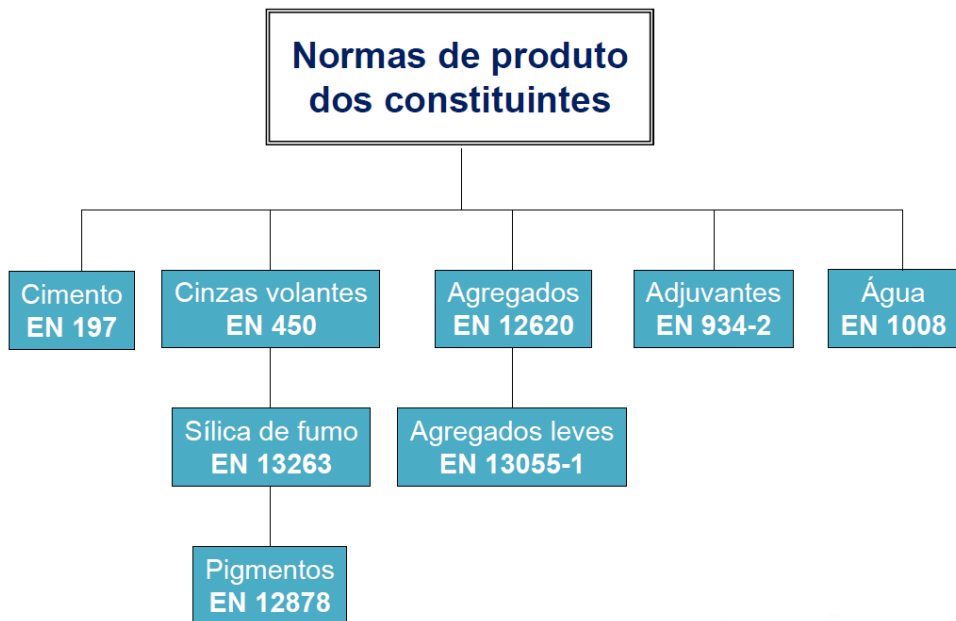


Figura 2.8 - Enquadramento Normativo dos constituintes do betão (Betão Liz, José Marques)

2.3.2.1. Cimentos

O cimento, que funciona como ligante hidráulico na mistura, é um material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água, forma uma pasta que faz presa e endurece por meio de reações e processos de hidratação e que, depois de endurecer, mantém a sua resistência e estabilidade mesmo debaixo de água.

A seleção do cimento tem em conta alguns aspetos como a utilização final do betão, a execução da obra, as condições de cura e de exposição a que betão estará sujeito, a reatividade potencial dos agregados com os álcalis dos constituintes.

De acordo com a norma NP EN 197-1 (2001) existem cinco tipos de cimento. O tipo CEM I, vulgar, cimento Portland, constituído essencialmente por clínquer. O tipo CEM II é subdividido em cimento Portland de escória, cimento Portland de sílica de fumo, cimento Portland de pozolana, cimento Portland de cinza volante, cimento Portland de xisto cozido, cimento Portland de calcário e cimento Portland composto, o tipo CEM III, cimento do alto-forno, o tipo CEM IV, cimento pozolânico, e o tipo CEM V, cimento composto. Apenas o cimento tipo III não apresenta o clínquer como principal constituinte, mas sim a escória de alto forno.

De todos os tipos de cimentos, aquele mais conhecido e com maior utilização é o cimento Portland, constituído por pós muito finos, designados por clínquer e uma quantidade pequena de sulfato de cálcio, usualmente o gesso, que atua como retardador de presa, e que ao ser amassado com água forma uma pasta cujo endurecimento se dá apenas pela reação química entre o pó e a água.

A matéria-prima do clínquer é formada por calcário (carbonato de cálcio), argila (silicatos de alumínio e ferro) e outras substâncias ricas em sílica, alumina ou ferro moídas.

2.3.2.2. Reações de hidratação

Citando Miranda (2006): *“A hidratação dos silicatos bicálcico e tricálcico origina uma família de silicatos de cálcio hidratados e hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), uma parte do qual fica em solução e outra cristaliza, portlandite. O hidróxido de cálcio é o principal responsável pela elevada alcalinidade do betão, com um pH da ordem dos 13. O silicato bicálcico liberta menor quantidade, cerca de um terço, de hidróxido de cálcio que o silicato tricálcico, sendo por isso, este último o principal responsável pela elevada alcalinidade do betão.”*

As propriedades ligantes do cimento devem-se aos silicatos de cálcio hidratados que só são estáveis na presença de uma solução sobressaturada de hidróxido de cálcio.

O aluminato tricálcico reage com a água e, na presença de uma solução sobressaturada de hidróxido de cálcio, liberta-se o aluminato de cálcio hidratado. Devido à rápida reação do aluminato tricálcico com a água, provocando uma presa instantânea, adiciona-se ao cimento uma pequena quantidade de sulfato de cálcio, usualmente o gesso. O gesso, acrescentado para retardar a presa, combina-se com aluminato de cálcio, formando a etringite (primária) sulfoaluminato de cálcio hidratado, envolvendo e protegendo da ação da água o aluminato de cálcio ainda não hidratado. Após o gesso ser consumido, a etringite torna-se instável, dando origem ao monosulfoaluminato de cálcio hidratado.

Do ponto de vista da durabilidade do betão, os compostos resultantes da hidratação dos silicatos têm relativamente ao ataque químico, uma ação nociva, uma vez que a presença de soluções sobressaturadas de hidróxido de cálcio é necessária às reações que originam a formação de etringite secundária, ou diferida (reação sulfática) e dos silicatos alcalinos (reação alcali-agregados), ambas reações expansivas.

Por outro lado, o hidróxido de cálcio é benéfico no que diz respeito à corrosão das armaduras, sendo responsável por criar um ambiente de elevada alcalinidade, originando a formação de uma camada de óxido em torno das armaduras, designada por película passiva, que as protege da corrosão. A presença

deste hidróxido tem também um efeito retardador na progressão da carbonatação do betão e a um aumento do teor em hidróxido de cálcio corresponde um aumento do teor crítico de cloretos, valor a partir do qual se dá a destruição da película passiva.

2.3.2.3. Adições e Adjuvantes

É possível alterar a composição do clínquer e conseqüentemente alterar a composição do cimento. No entanto, não é um processo fácil ou barato, pelo que muitas vezes se recorrem a adições e adjuvantes. Os adjuvantes são então materiais adicionados, durante o processo de mistura do betão, em pequenas quantidades em relação à massa de cimento, para modificar as propriedades do betão fresco ou endurecido, como por exemplo retardar ou acelerar a presa, adjuvantes hidrófugos, plastificantes, introdutores de ar, etc. As adições, por sua vez, podem ser classificadas do tipo I (adições quase inertes) ou do tipo II (adições pozolânicas ou hidráulicas latentes) e modificam o equilíbrio químico no interior do cimento.

As pozolanas são produtos constituídos por sílica e alumina e que podem ter origem natural, artificial, ou ainda em subprodutos industriais, como as cinzas volantes e a sílica de fumo, e devem conter pelo menos 25% de sílica reativa. As pozolanas têm pouca capacidade ligante intrínseca, mas na presença da água reagem com o hidróxido de cálcio a temperatura normal, formando produtos com capacidade ligante.

As pozolanas naturais provêm de rochas vulcânicas, com origem em magmas ricos em sílica que solidificaram rapidamente, ficando no estado amorfo ou criptocristalino.

Em Portugal, nas regiões autónomas da Madeira e dos Açores existem pozolanas naturais. No entanto, as pozolanas da antiga colónia de Cabo Verde, notáveis pela sua elevada reatividade, foram as mais utilizadas.

As pozolanas artificiais provêm de argilas submetidas a temperaturas suficientes para a sua desidratação, mas inferiores ao início da fusão. Dentro dos subprodutos industriais, aqueles que têm características pozolânicas são as cinzas volantes, provenientes da queima do carvão.

Um outro tipo de adição é a escória de alto-forno, subproduto industrial, obtida pela combinação da ganga dos minérios de ferro com fundentes apropriados e cinzas do carvão utilizado na combustão. Estas adições, quando utilizadas em quantidade e qualidade adequadas, conduzem a características finais semelhantes às obtidas com as pozolanas e resistências químicas, por vezes, ainda superiores, embora as resistências mecânicas possam não ser tão elevadas. As escórias são materiais com propriedades hidráulicas, verdadeiros cimentos, mas que reagem com extrema lentidão.

Pozolanas e escórias de alto-forno, quando têm reatividade adequada, são utilizadas quer para melhorar a durabilidade química do betão quer para baixar o seu calor de hidratação. No entanto, podem, em alguns casos, ser apenas usadas para baixar o custo do betão, ou para corrigir a granulometria do agregado.

2.3.2.4. Porosidade e Permeabilidade

A permeabilidade é a propriedade de um meio poroso se deixar atravessar por um fluido sob a ação de uma diferença de pressão. No caso do betão é uma característica difícil de determinar, mas com grande relevância na previsão de durabilidade de uma estrutura, especialmente se esta estiver sujeita a ambientes agressivos como os ambientes marítimos. Segundo Mehta (1991), os valores usuais de permeabilidade do betão corrente (com uma composição de 300-350 kg/m³ de cimento, relação água-cimento entre 0,5-0,6 e agregado nas dimensões de 25-37 mm) é de 1 a 2 x 10⁻¹² m/s. A permeabilidade irá depender de fatores como a relação água-cimento, condições de cura e betonagem, que por sua vez se relacionam com abertura de fendas que facilitam a permeabilidade de agentes não desejáveis. Mehta (1991) afirma ainda que baixas quantidades de cimento e elevadas relações água-cimento originam

betões muito permeáveis. No caso da fase de construção, por exemplo, ao expor o betão quente ao ar ou água fria imediatamente após a remoção das cofragens irá conduzir à abertura de fendas. Também os ciclos de temperatura quente e frio, por exemplo em zonas de salpicos poderão causar fendas que tornam o betão mais vulnerável a efeitos de permeabilidade.

Segundo Miranda (2006), quanto à porosidade, podem ser três as classes de poros presentes numa superfície de betão: microporos, poros capilares e macroporos. Os primeiros resultam da hidratação do cimento, têm dimensões da ordem do nanómetro e não dependem da relação água-cimento, para além de que são os que menos interferem na degradação do betão. Os poros capilares assumem diâmetros que andam na ordem de grandeza dos centímetros aos micrómetros e resultam do excesso de água de amassadura que se adiciona para melhorar a trabalhabilidade e colocação do betão, em que essa água que não é utilizada na hidratação e evapora dando lugar a vazios. Os macroporos dependem essencialmente da granulometria dos agregados e dos métodos de mistura e compactação do betão, sendo dimensões superiores a 10 micrómetros sendo, a par com os poros capilares, os que têm maior influência na degradação do betão.

Um outro fenómeno relacionado com a porosidade é a capilaridade que se define como a facilidade que os poros capilares têm em captar líquidos na superfície de contato entre esse líquido e o material poroso, ou seja, é a penetração de um líquido, por exemplo no betão, por ação da tensão superficial que atua nos seus poros capilares.

2.3.2.5. Relação água-cimento

Esta relação controla parâmetros como a permeabilidade e porosidade e, como tal, influencia a penetração de substâncias químicas e humidade. Neste campo é consensual que uma diminuição da relação água-cimento vai proporcionar uma melhor durabilidade do betão e conseqüente redução da penetração de cloretos. Também a velocidade de carbonatação é fortemente influenciada por esta relação, bem como o aparecimento e propagação de fendas. Um estudo de Collepari verifica que betões com relações água-cimento mais baixas, têm também profundidades de penetração de cloretos mais baixas, o que é favorável para as armaduras. Este abaixamento do índice água-cimento pode ser conseguido com a ajuda de superplastificantes. A relação das várias razões água-cimento, com a penetração de cloretos ao longo do tempo encontra-se representada na Figura 2.9.

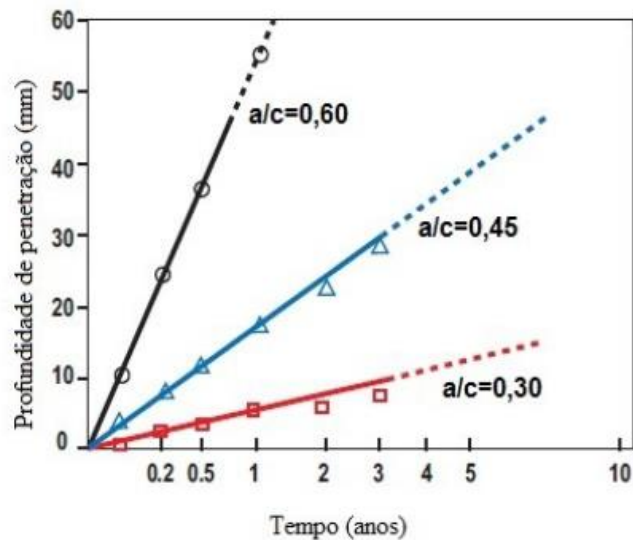


Figura 2.9 - Comparação da relação água-cimento com a profundidade de penetração (Collepari, 2008)

No caso da carbonatação, também a relação água-cimento assume importância devido ao facto de condicionar a permeabilidade e penetração de agentes exteriores. Betões com elevadas taxas de água-cimento dão origem a betões mais porosos e permeáveis, como se verifica no Quadro 2.2, permitindo uma maior difusão de CO_2 que é um elemento necessário para a reação de carbonatação, consequentemente desfavorável para um betão de boa qualidade.

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

Quadro 2.2- Influência da relação água-cimento com a capilaridade (Thaulow, 2007)

2.3.2.6. Recobrimento

A espessura de recobrimento é um fator importante no que diz respeito à durabilidade da estrutura pois é a primeira camada de betão que está a proteger a armadura e como tal condiciona o aparecimento e desenvolvimento de corrosão. O dimensionamento do recobrimento depende das condições a que o betão estará sujeito, e para além de proteger as armaduras contra a corrosão também deve assegurar a transmissão de forças entre a armadura e o betão e promover a resistência ao fogo.

Rodrigues citando Mackechnie (2001) afirma que o aumento da durabilidade das estruturas é proporcional à adoção 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 retrações na fase inicial e consequente aparecimento de fissuras. Costa afirma que a utilização de recobrimentos pequenos (inferiores a 50 mm) não é adequada para o ambiente marítimo, pois conduz a períodos de iniciação de degradação demasiado precoces para garantirem uma durabilidade adequada para as estruturas. Um outro estudo de Ferreira (2006), através de ensaio laboratorial, mostra que enquanto um recobrimento nominal de 45 mm apenas verifica o estado limite

de serviço durante 3 anos, um recobrimento nominal de 75 mm o verifica durante 19 anos, tal como se mostra na Figura 2.10. Com esta análise, o projetista pode confirmar que o aumento de recobrimento até 75 mm não é suficiente para melhorar o desempenho de forma a verificar a vida útil pretendida (50 anos em média). Outra estratégia terá que ser adotada de forma a verificar a vida útil, como por exemplo combinar o aumento de recobrimento com outro tipo de cimento, ou aplicar uma proteção ao betão de forma a atrasar a penetração de cloretos no betão. O Quadro 2.3 indica os recobrimentos a adotar em função do período de vida útil da estrutura e das classes de exposição.

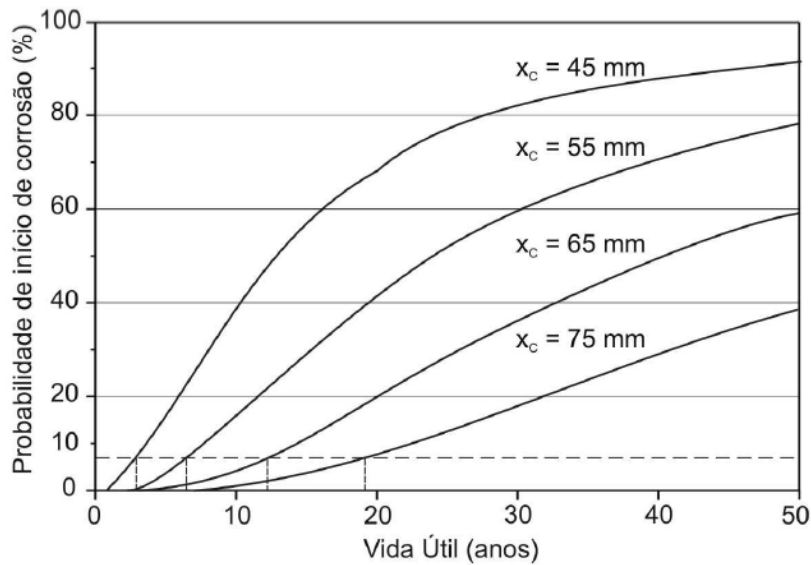


Figura 2.10 - Efeito do recobrimento na durabilidade da estrutura (Ferreira, 2006)

		X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
Tempo de vida útil do projecto de 50 anos (classe estrutural S4)	Recob. mínimo	10	15	25	30	35	40	45
	Recob. nominal	20	25	35	40	45	50	55
Tempo de vida útil do projecto de 100 anos (classe estrutural S6)	Recob. mínimo	20	25	35	40	45	50	55
	Recob. nominal	30	35	45	50	55	60	65

Quadro 2.3 - Valores de recobrimento a adotar de acordo com as classes de exposição (Eurocódigo 2, 2010)

2.3.2.7. Colocação, Compactação e Cura

Os processos referentes a este parágrafo requerem especial atenção porque muitos destes já dependem da mão humana e não tanto do betão como material. Assim, procedimentos incorretos podem originar betões de pior qualidade, acelerando os mecanismos de degradação. A colocação e compactação são processos que ocorrem praticamente em simultâneo e nesta fase pretende-se que o betão seja colocado o mais próximo possível da posição final de modo a evitar segregação. Para tal devem ser cumpridas algumas regras como por exemplo, colocar o betão em camadas uniformes planas; a espessura dessas camadas deve corresponder ao método como ele irá ser vibrado, de modo a retirar o ar do fundo; a velocidade de colocação e compactação deve ser a mesma; a camada seguinte deve ser betonada só depois da anterior ter sido devidamente compactada; a cofragem e armadura não devem sofrer deslocamentos. Verifica-se que uma boa compactação irá condicionar a durabilidade do betão uma vez que este processo consiste na remoção de bolhas de ar e, como tal, dar-se-ão menos superfícies porosas, reduzindo a difusão e concentração de cloretos.

Depois da colocação e compactação do betão segue-se o processo de cura, altura em que se dá a hidratação do cimento e o betão começa a ganhar resistência. De acordo com Ferreira (2000), os procedimentos de cura estão relacionados com a temperatura e o movimento de humidade entre o betão e o exterior e têm como objetivo manter o betão o mais saturado possível, até que os espaços preenchidos por água, na pasta de cimento fresca, sejam ocupados pelos produtos da hidratação. Também a secagem prematura, que causa retração plástica deve ser contabilizada bem como as tensões térmicas a que o betão estará sujeito no processo de cura. Naturalmente, que estas precauções são diferentes entre volumes e formas de betonar, localização das obras, condições climatéricas, etc. Uma das formas tradicionais de cura do betão consiste na adição de óleo nas cofragens antes de betonar, deixando as cofragens por um determinado período de tempo. Se forem retiradas precocemente, deve molhar-se e envolver-se o betão em folhas de polietileno ou materiais semelhantes de modo a evitar a evaporação da água a partir do betão.

2.3.2.8. Degradação do betão

A deterioração ou degradação do betão começa na alteração das suas propriedades mecânicas, físicas e químicas, tanto na superfície como no interior. Essa deterioração resulta na desintegração dos componentes manifestando-se sob a forma fendilhação, destacamento e desagregação.

Tal degradação tem origem, normalmente, no incumprimento de boas práticas na colocação, consolidação, cura, ou até de uma má escolha dos constituintes do betão. Também as condições a que o betão irá estar exposto influenciam o nível de degradação, tal como já se referiu atrás, nomeadamente, temperatura, humidade, precipitação, vento, etc.

Os agentes degradadores definem-se como um grupo de fatores que pode afetar o desempenho de um material de construção, um componente ou um sistema. Poderão atuar isoladamente ou em conjunto e, tal facto condiciona a velocidade de degradação do material.

A degradação das propriedades do betão é um processo complexo, largamente determinado pelas propriedades físico-químicas do betão (interno) e da forma como interage com o meio ambiente (exterior). Estes processos de deterioração impedem que o betão desempenhe as suas funções como inicialmente pretendido. Os fatores internos do material estão relacionados com a sua qualidade, isto é, a forma como é misturado, colocado e curado, enquanto os externos, como fluência, retração, efeito térmico dependem de elementos exteriores. Uma das características do betão, como produto final, que condiciona a sua degradação é a porosidade, por razões que já foram explicadas em pontos anteriores. Os fatores de degradação poderão ser mecânicos, biológicos, químicos, físicos e eletromagnéticos tal como se apresentam nos Quadros 2.4 e 2.5.

Factor de Degradação	Processo	Degradação
Mecânicos		
Carregamento estático	Deformação	Deflexão, fendilhação, rotura
Carregamento cíclico	Fadiga, deformação	Deflexão, fendilhação, rotura
Carregamento por impacto	Fadiga	Vibração, deflexão, fendilhação, rotura
Biológicos		
Micro-organismos	Produção de ácido	Lixiviação
Bactéria	Produção de ácido	Lixiviação
Químicos		
Água pura	Lixiviação	Desagregação do betão
Ácido	Lixiviação	Desagregação do betão
Ácido e gases ácido	Neutralização	Despassivação do aço
Dióxido de carbono	Carbonatação	Despassivação do aço
Cloretos	Penetração, destruição de camada de passivação	Despassivação do aço
Despassivação do aço + H ₂ O + O ₂	Corrosão	Expansão do aço, perda de \varnothing e de aderência
Tensão + cloretos	Corrosão do aço	Rotura dos tendões de pré-esforço
Sulfatos	Pressão dos cristais	Desagregação do betão
Agregado(silica) + álcalis	Reacção da sílica	Expansão, desagregação
Agregado(carbonato) + álcalis	Reacção do carbonato	Expansão, desagregação

Quadro 2.4 – Fatores e processos de degradação mecânicos, biológicos e químicos (Ferreira, 2000)

Físicos		
Varição de temperatura	Expansão/Contração	Deformação restringida
Varição de humidade	Retração e expansão	Deformação restringida
Baixa temperatura + água	Formação de gelo	Desagregação do betão
Sal descongelante + geada	Transferência de calor	Destacamento do betão
Gelo (mar)	Abrasão	Destacamento, fendilhação
Trânsito	Abrasão	Desgaste, e rotura
Água corrente	Erosão	Danos superficiais
Água turbulenta	Cavitação	Cavidades
Electromagnéticos		
Electricidade	Corrosão	Expansão do aço, perda de \varnothing e de aderência
Magnetismo	Corrosão	Expansão do aço, perda de \varnothing e de aderência

Quadro 2.5 - Fatores e processos de degradação físicos e eletromagnéticos (Ferreira, 2000)

• Causas mecânicas e físicas da degradação

○ Ciclos de gelo-degelo e ataque de geada

Nestes ciclos é importante distinguir duas fases: antes e após o endurecimento do betão. Ferreira citando Higgins (1981) afirma que, se o betão congelar antes do endurecimento, não se dá o processo de hidratação enquanto se mantiverem as temperaturas baixas. Assim que se iniciar o degelo, o betão hidrata sem grande perda de resistência apesar da expansão da água que tende a aumentar o índice de

vazios. Por outro lado, se o betão congela depois de endurecer, mas sem ter adquirido resistência suficiente, a expansão associada ao congelamento resultará numa perda de resistência irreversível.

Quando o betão endurecido e saturado é exposto a baixas temperaturas, a água retida nos poros capilares congela e expande. Quando descongela, verifica-se um acréscimo de expansão dos poros de modo que, em ciclos consecutivos de gelo-degelo, existe um efeito cumulativo com origem nos poros de maior dimensão. Estes ciclos repetitivos provocam um aumento da pressão dilatante, resultando em fendilhação.

O ataque das geadas é outro fenómeno indesejado no betão que influencia propriedades intrínsecas do betão como fluência e retração. Novamente o grau de hidratação e a estrutura porosa relacionam-se com este fenómeno, uma vez que se o agregado for extremamente absorvente e possuir uma estrutura porosa suscetível ao ataque da geada, os estragos são maiores.

- **Tensões térmicas**

As variações térmicas numa estrutura levam a variações de volume. Numa estrutura impedida desses aumentos, com tensões de tração superiores às tensões resistentes do betão, poderá ocorrer fendilhação.

Estes efeitos de gradientes térmicos, devido à hidratação do cimento, com efeito nas tensões de tração, têm um impacto maior na betonagem de estruturas de grande porte (barragens, cais, fundações). Estes movimentos de contração e expansão devido às variações de temperatura poderão provocar reabertura de fendas. Neste ponto, importa distinguir a temperatura da superfície do betão, da temperatura do seu núcleo. Também este diferencial entre a superfície (quente) que se ajusta mais rapidamente às variações, e o núcleo (frio) que se ajusta mais lentamente poderá resultar em danos como o destacamento do betão.

- **Retração**

A retração do betão é uma propriedade intrínseca do material que resulta na diminuição de volume de um elemento com o tempo, ou na fissuração desse elemento devido ao desenvolvimento de tensões de tração, resultantes do constrangimento de movimento do betão. Neville e Brooks (2010) referem que o aparecimento destas fendas dá-se ainda no estado fresco, mas é no processo de secagem que mais se manifestam e podem assumir dimensões que vão desde os micro milímetros até a alguns milímetros. O processo de retração pode ser de vários tipos conforme se explica a seguir.

A retração plástica é um exemplo de retração que ocorre no estado fresco devido à perda de água na interação com o ambiente. A exsudação do excesso de água, em betões convencionais, não provoca grandes deformações, exceto em casos de temperaturas elevadas, ventos fortes ou cura inadequada. Em betões com razão água-cimento baixa, não existe água em excesso pelo que em condições adversas, podem surgir fendas com valores na ordem dos centímetros.

A retração térmica resulta do calor de hidratação do cimento, que provocam numa primeira etapa a dilatação do elemento. Assim que é atingida a temperatura máxima, há um arrefecimento progressivo até se atingir a temperatura ambiente. Em consequência, o betão já endurecido contrai-se provocando deformações, que são mais significativas em betões com elevadas dosagens de cimento ou em elementos de grandes dimensões em que a dissipação do calor é mais lenta como se mostra na Figura 2.11.



Figura 2.11 - Efeito da retração térmica em elemento de grandes dimensões (Costa, 1997)

Na retração autogénea, a hidratação contínua do betão, na presença da água, conduz à sua expansão. No entanto, se não existir troca de humidade do exterior com a pasta de cimento, ocorre a retração. Esta retração, é consequência da retirada de água dos poros capilares por hidratação da pasta de cimento não hidratada. Este tipo de retração é mais comum em betões com razão água-cimento inferiores a 0,5, uma vez que a humidade relativa interna nos poros capilares desce abaixo do valor mínimo necessário para ocorrer a hidratação.

A retração por secagem é provocada pela saída de água do betão endurecido, quando este é exposto ao ar não saturado. Parte deste fenómeno é irreversível e deve ser diferenciado da parte reversível do movimento provocado pela alternância das condições secas e molhadas. O esvaziar dos capilares provoca uma perda de água sem retração. Uma vez perdida a água capilar, assiste-se à perda de água absorvida provocando a retração. Por outro lado, se o processo de secagem é acompanhado de carbonatação, a pasta de cimento não é capaz de acomodar o movimento de humidade de modo que a retração irreversível é maior. Ferreira citando Picket (1956) afirma que a retração é tanto maior quanto maior por a razão água-cimento, por esta determinar a quantidade de água evaporável na pasta de cimento, e a velocidade com que se pode deslocar até à superfície. Nos betões convencionais, a retração por secagem é o fenómeno mais importante e, tipicamente, o único que se contabiliza no cálculo estrutural.

Por último, existe o processo de retração por carbonatação que ocorre quando o dióxido de carbono é fixado pela pasta de cimento, a massa deste aumenta e consequentemente, aumenta a massa de betão.

○ **Fluência e fadiga**

A fluência define-se como o aumento de deformação do betão quando sujeito a uma tensão constante. Esta propriedade tem particular importância porque a deformação por fluência pode atingir valores muito superiores aos valores de deformação aquando da aplicação da carga que por vezes só se manifestam passados anos. A não consideração da fluência nos elementos estruturais faz com que muitas vezes as cargas passem a ser transmitidas para elementos não estruturais, como paredes de alvenaria que apresentam aberturas de fendas.

A fadiga resulta no aumento da deformação, através da aplicação repetida de uma carga ao longo do tempo. Este fenómeno pode levar à rotura do betão quando este é sujeito a tensões cíclicas ou carregamentos repetitivos, sempre inferiores à tensão máxima resistente. Exemplos de estruturas deste tipo são as estruturas marítimas sujeitas às ações do mar e do vento, ou pontes e estradas. A rotura por fadiga depende do número de ciclos de carga e do nível de tensão instalado.

- **Ondas de choque (impactos)**

Um estudo de Clifton e Knab (1983) mostra que o betão está sujeito a impactos repetidos que devem ser contabilizados na fase de projeto de modo a avaliar a sua capacidade resistente e absorção de energia. Uma das deformações mais presentes é o destacamento. Os melhores exemplos que expõem o betão a estas situações são: sismos, bombardeamentos, cravação de estacas, forças de compressão exercidas por equipamentos nas fundações que os sustentam, manuseamento de peças prefabricadas. De um modo geral, a resistência ao choque aumenta com o aumento da resistência à compressão.

- **Abrasão**

Com base na Mapei (2014), sabe-se que a abrasão poderá englobar vários tipos de desgaste ao betão como esfregamento, enrolamento, escorregamento ou fricção repetitiva. Devido a esta diversidade de ações torna-se difícil de avaliar a resistência à abrasão do betão. A semelhança dos choques (impactos) o fator mais determinante é a resistência à compressão. Para uma melhor resistência à abrasão deve-se fabricar um betão com agregado mais grosso e o processo de cura deverá ser o dobro de um betão normal. O melhor exemplo da utilização deste tipo de betões, corresponde aos pisos industriais sujeitos à passagem de rodas metálicas pesadas.

- **Erosão e cavitação**

A erosão é um tipo de desgaste associado a escoamento de água, grande parte das vezes com material em suspensão. A cavitação é a perda de material provocado pela implosão de bolhas de vapor no escoamento de um fluido a elevada velocidade. O escoamento laminar de água não é prejudicial para o betão, mas sim as mudanças de direção e velocidade que o escoamento pode sofrer, ou quando ocorrem diminuições de pressão que causam picadas no betão.

- **Deterioração devido ao fogo**

Na ocorrência de um incêndio, o betão fica sujeito a elevadas temperaturas que devem ser consideradas, uma vez que o betão se aplica, na maior parte dos casos em elementos estruturais. O efeito do incêndio no betão depende das temperaturas atingidas, mas também da composição do betão: tipo de cimento, razão água-cimento, tipo de agregados, dosagem de cimento e recobrimento.

Um dos efeitos notórios do ataque do fogo é o destacamento da superfície do betão, estando esta chamuscada. Saindo o betão superficial, volta-se a encontrar betão branco com aparecimento de fendas que penetram em direção ao interior atravessando partículas de agregados. Neste caso, também surgem muitas fendas em torno da armadura pois a dilatação térmica do aço é superior à do betão, conduzindo ao destacamento do betão.

A resistência à compressão, em caso de incêndio é influenciada: pela quantidade de água quimicamente ligada que se perde durante a exposição ao fogo; pelas alterações químicas que destroem a ligação pasta de cimento agregado; pela degradação gradual da pasta de cimento endurecido.

Segundo Neville e Brooks (2010), os agregados expandem ao serem aquecidos, mas a pasta de cimento só expande até determinado ponto, sofrendo depois de retração e, este efeito combinado conduz à perda de resistência do betão e ao aparecimento de fendas. Em geral, betões com elevados coeficientes de dilatação térmica são menos resistentes às variações de temperatura do que os betões com coeficientes baixos.

Outra propriedade afetada em caso de fogo é a resistência à flexão, mais do que a resistência à compressão, sendo a perda de resistência menor quando o agregado não possui sílica.

• Causas químicas da degradação

A resistência do betão aos ataques químicos está diretamente relacionada com a porosidade, composição do cimento e condições de endurecimento. Muitos sais e soluções ácidas presentes no meio ambiente podem reagir com a pasta de cimento deteriorando-o, nomeadamente água no estado puro ou a água do mar. A grande parte dos problemas de ataques químicos está no facto de certos fluídos agressivos penetrarem para o interior do betão através dos poros, pelo que a permeabilidade e porosidade, que já foram referidas em pontos anteriores assumem um papel de relevo. Os constituintes desses fluídos agressivos podem penetrar o betão como resultante de três forças.

- Difusão: resulta da diferença de concentrações iónicas entre um fluido externo agressivo e o fluído interno nos poros do betão.

- Pressão hidrostática: diferenças na pressão dos fluídos em superfícies opostas de um elemento.

- Forças capilares: o meio líquido penetra nos poros do betão devido a um mecanismo capilar.

Naturalmente que as combinações podem ser influenciadas por gradientes de temperaturas, gelo, carregamento, etc. De entre os fluídos agressivos destacam-se os ácidos minerais, ácidos orgânicos, sulfatos, cloretos, açúcares, nitratos, fenóis e compostos amoníacos. As situações mais graves são quando soluções quentes dos fluídos atrás referidos são entornados na superfície do betão e absorvidos.

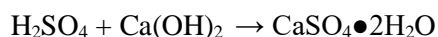
○ Ataque ácido

Este ataque resulta de uma reação entre a solução atacante e os compostos do cimento, conduzindo à formação de compostos secundários que são lixiviados do betão, ou permanecem numa forma não aderente ao betão, resultando na perda gradual de resistência.

Segundo Ferreira (2000), as soluções ácidas minerais (sulfúrico, hidrolórico, nítrico e fosfórico) e orgânicas (lático, acético, fórmico, tânico e propiónico) são as mais agressivas para o betão.

Devido á alcalinidade do betão, o ácido não consegue penetrar no betão denso sem ser neutralizado à medida que penetra para o interior. Quer isto dizer que o betão não é deteriorado no interior sem que antes não tenha sido destruída a pasta de cimento.

O ácido atacante, normalmente deposita o produto de reação (sal) na superfície do betão. Por exemplo, ácido sulfúrico reage com o hidróxido de cálcio do cimento produzindo sulfato de cálcio que é depois depositado como gesso.



Esta reação pode ainda prosseguir, resultando na cristalização do produto de reação, originando forças expansivas. Ou seja, quando o sulfato de cálcio reage com os aluminatos de cálcio hidratados no cimento, forma-se o sulfoaluminato de cálcio, vulgarmente conhecido por etringite.

Também as águas ácidas, devido à presença de dióxido de carbono, ácidos orgânicos ou inorgânicos, são mais agressivas. O grau de ataque aumenta com o aumento da acidez e diminuição do valor de pH.

- **Ataque dos sulfatos**

Ferreira (2000) afirma ainda que os ataques de sulfatos ocorrem quando o sistema poroso do betão é penetrado por soluções de sulfatos com origem nas águas dos solos em contato com o betão, água do mar ou efluentes industriais.

Tais ataques resultam da reação química dos iões de sulfato (como elemento agressivo) com os compostos de alumina, iões de sulfatos, cálcio e hidróxidos dos cimentos que contenham clínquer Portland, formando etringite.

Em termos genéricos, a deterioração consequente do ataque dos sulfatos manifesta-se sob a forma de expansão e fendilhação da pasta de cimento.

Outra reação, mas menos comum, especialmente em ambientes frios e molhados, é a formação do composto taumasite (sulfocarbonato de cálcio e sílica hidratada) que prejudica a fixação da pasta de cimento tirando resistência ao betão.

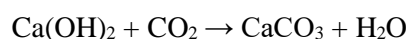
Também podem ocorrer nos betões reações sulfáticas de origem interna, que conduzem à formação de etringite retardada (DEF), a qual pode-se explicar como sendo uma remobilização dos sulfatos inicialmente contidos na pasta de cimento após o endurecimento do betão. Tais reações, do tipo expansivas, poderão ser causadas por temperaturas de cura inadequadas e manifestam-se sob a forma de fendilhação e desagregação do betão, como se mostra na Figura 2.12.



Figura 2.12 - Exemplo de reação expansiva por ataque de sulfato (Mapei, 2014)

- **Carbonatação**

A carbonatação é o processo pelo qual o dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera reage (na presença de humidade) com os minerais do cimento hidratado. O CO_2 reage com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) para formar carbonato de cálcio (CaCO_3):



Numa primeira fase o dióxido de carbono difunde-se para o interior do betão e, em seguida reage com as moléculas de água pelo que, por último, surge o ácido carbónico que irá reagir com os componentes alcalinos do betão, sendo então o ácido carbónico o elemento agressivo da reação. Importa referir que este fenómeno poderá ocorrer em ambiente marítimos devido às condições que lá se reúnem.

Ferreira (2006) expõe que a carbonatação possui efeitos que se desenvolvem no betão, como a retração, que já se abordou num ponto anterior. Outro fenómeno com origem na carbonatação, é a redução do pH da água do betão endurecido que terá influência direta no comportamento do aço das armaduras.

Um dos fatores capaz de controlar a carbonatação é a difusividade da pasta de cimento endurecido que é função da porosidade do betão, pelo que pode ser gerida através do recobrimento do betão, do tipo de cimento, da razão água-cimento e do teor de humidade (50% a 70%). Uma vez que a porosidade interfere na carbonatação, nomeadamente na velocidade com que se propaga, um betão mais denso será uma forma de combater o ataque, algo que é conseguido através de uma baixa relação água-cimento ou com cimentos adequados, como se mostra na Figura 2.13.

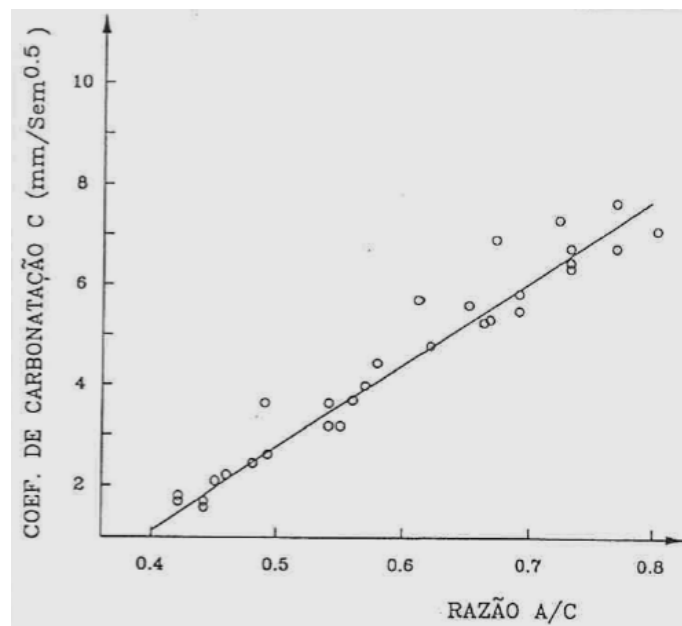


Figura 2.13 - Comparação de razões água-cimento com os coeficientes de carbonatação (Costa, 1997)

○ Ataque dos cloretos

O ataque dos cloretos é perigoso para as estruturas de betão armado, mas neste caso, não tanto para o betão, mas sim para o aço das armaduras, sendo a corrosão o mecanismo que desencadeia a deterioração de tais estruturas. Esta corrosão é induzida pela presença de iões de cloro que irão atacar mais ou menos rápido as armaduras após a passagem da primeira camada de betão. Neste processo são vários os fatores que condicionam o transporte do cloro, nomeadamente a difusão de iões, a sucção capilar ou as reações físicas e químicas que irão fixar o cloro. Para a ocorrência de corrosão das armaduras são necessárias reações químicas e correntes elétricas pelo que os iões de cloro são apenas uma parte dos agentes que contribuem para o mecanismo de corrosão, tal como se irá explicar mais adiante.

O cloro poderá surgir a partir dos agregados contaminados, água de mistura ou até alguns adjuvantes. Associados ao carbono, são os principais responsáveis pela despassivação das armaduras. Naturalmente que a qualidade da mistura e o meio em que se inserem as estruturas também condicionam o fenómeno de ataque por cloretos. Como já foi visto anteriormente, o recobrimento assume muita importância no que diz respeito à penetração de agentes agressivos ao betão, bem como o tipo de cimento, que condiciona a concentração de cloro e a sua reação com os aluminatos. Por sua vez, o ambiente envolvente determina a velocidade de penetração dos cloretos (ambientes secos e saturados não são tão agressivos) e a existência dos mesmos, pois como já foi visto, ambientes marítimos são caracterizados

pela predominância de cloretos. A Figura 2.14 relaciona as classes de exposição com a classe de resistência a adotar, influenciadas pelo mecanismo de corrosão.

Corrosão										
	Corrosão induzida por carbonatação				Corrosão induzida por cloretos			Corrosão induzida pelos cloretos da água do mar		
	<i>XC1</i>	<i>XC2</i>	<i>XC3</i>	<i>XC4</i>	<i>XD1</i>	<i>XD2</i>	<i>XD3</i>	<i>XS1</i>	<i>XS2</i>	<i>XS3</i>
<i>Classe indicativa de resistência</i>	<i>C20/25</i>	<i>C25/30</i>	<i>C30/37</i>		<i>C30/37</i>		<i>C35/45</i>	<i>C30/37</i>	<i>C35/45</i>	

Figura 2.14 - Classes de resistência em função do índice de cloretos (Rui Azevedo, adaptado do EC2, 2010)

Aspetos como a temperatura e humidade exterior e o pH do betão também são condicionantes a este tipo de ataque, relativizando-o.

Segundo Azevedo (2016) um dos métodos expeditos para a quantificação do teor de cloretos consiste na perfuração do elemento de betão a diferentes profundidades, retirando o pó resultante da perfuração (mínimo 20 g). Este pó seguirá para análise numa mistura com uma solução ácida que donde resultará uma reação eletroquímica passível de ser medida. No caso de ambiente marítimo, o índice de cloretos é muito elevado pelo que este fenómeno tem mais impacto nas estruturas aí presentes.

- **Ataque álcali-agregado**

Este tipo de ataque resulta da reação entre os metais alcalino (óxido de potássio e óxido de sódio, por exemplo) e os agregados reativos (geralmente silicatos). Estas reações são do tipo expansivas e provocam fendilhação no betão com aberturas que podem ir dos 0.1mm até aos 10mm mas que não atingem grandes profundidades e como tal não interferem no comportamento estrutural do elemento.

A forma de evitar estas reações passa por limitar o teor em álcalis nos cimentos e selecionar agregados com baixa reatividade aos álcalis de acordo com a especificação do LNEC E 415. De referir que estes ataques são menos suscetíveis em betões com baixa permeabilidade.

- **Reação álcali-silica**

Certas rochas siliciosas reagem com o cimento formando um gel álcali-silica de complexidade variável. Este gel pode reagir com os iões de cálcio, originando a partir do hidróxido de cálcio ou outros produtos de hidratação do cimento, um complexo branco, opaco de sílica-cálcio ou álcali-silica-cálcio. Os produtos das reações álcali-silica absorvem água e aumentam de volume transformando-se num gel mole que se dispersa em solução. Quanto mais água for absorvida, mais a fenda se propaga para o interior, tornando-a mais larga, como se mostra na Figura 2.15. Este tipo de ataque manifesta-se no betão através do destacamento de algumas partes.



Figura 2.15 - a) Exemplo do gel formado na reação álcali-silica; b) Exemplo de fendilhação causada por este ataque (Costa, 1997)

○ **Reação álcali-carbonatos**

À semelhança do que se passava nas reações anteriores, os álcalis libertados na pasta de cimento, ou outras fontes, reagem com os agregados que possam incluir carbonatos na sua composição. Ferreira (2004) afirma que um dos aspetos visíveis é a formação de zonas de reação de cerca de 2 mm em torno dos agregados da mistura. Esta zona formada é o lugar de onde emergem as fendas numa direção radial a estes espaços, que como consequência resultam em perda de adesão entre o agregado e a pasta de cimento, levando à deterioração do betão.

• **Causas biológicas da degradação**

De acordo com de Brito e Flores (2005), este tipo de deterioração do betão tem como primeira causa um organismo vivo, vegetal ou animal, que não o homem. Os locais mais frequentes para a ocorrência destes ataques são indústrias de óleo, gás, papel, bem como sistemas de armazenamento e tratamento de águas. Daqui salienta-se:

1. ataque de algas, líquenes e musgos - em geral não provocam problemas de maior exceto, no que se refere à saturação de água das superfícies nas quais se encontram incrustados;
2. ataque de moluscos - em zonas tropicais, detetaram-se casos de moluscos que se incrustaram no betão à velocidade de 1 cm por ano;
3. introdução de raízes de plantas e árvores no betão - estas introduzem-se nas fendas e pontos fracos do betão e podem gerar tensões internas importantes, contribuindo para a degradação acelerada do betão;
4. ataque biológico em sistemas de esgoto - em condições anaeróbias (sem oxigénio), o sulfeto de hidrogénio, que não é só por si muito agressivo para o betão, pode formar-se de sulfatos ou proteínas contidas nos esgotos; dependendo do equilíbrio químico e da turbulência do escoamento, este composto pode isolar-se da solução e ser oxidado por ação bacteriológica, formando ácido sulfúrico; este composto é altamente agressivo e origina um ataque ácido no betão acima do nível do escoamento; a médio prazo, a argamassa de cimento transforma-se completamente em gesso e perde todas as suas características resistentes; as únicas medidas eficazes nestes casos são o tratamento das águas, a utilização de camadas protetoras impermeabilizantes ou a substituição do betão armado por outro material mais adequado; mesmo os betões mais compactos e resistentes a ataques de ácidos não resistem muito tempo nestas condições;

• Causas eletroquímicas da degradação

Gjorv (2011) afirma que as causas de degradação por processos eletroquímicos aparecem associados ao fenómeno de corrosão das armaduras. Tais deteriorações exigem reparações na ordem dos milhares ou milhões de euros consoante a estrutura e o volume afetado. Nos Estados Unidos, o custo da reabilitação de pontes com corrosão nas armaduras é estimado em 24 mil milhões de dólares com um aumento anual de 500 milhões de dólares. Em zonas costeiras, como é de conhecimento geral, este fenómeno tem ainda mais impacto e reduz a durabilidade do projeto, obrigando a intervenções em fases precoces.

O betão, em particular o de recobrimento, funciona como uma barreira física às armaduras desde que não contaminado. Por outro lado, a elevada alcalinidade do hidróxido de cálcio, sódio e potássio conferem ao betão um pH na ordem dos 12 a 13, que permite criar no aço uma película fina de óxido de ferro designada por camada de passivação. Esta camada é formada logo que se dá a hidratação do cimento e enquanto lá permanecer, o aço está protegido.

Se essa mesma camada for destruída (despassivação das armaduras) dá-se início ao processo de corrosão. As causas que levam à destruição dessa camada podem ser o abaixamento do pH para valores na ordem dos 9, tanto pela ação do dióxido de carbono no betão, carbonatação, como pela lixiviação dos hidróxidos alcalinos, e ainda pela presença de iões de cloreto. Quando as condições de serviço se alteram e o betão fica sujeito à penetração de substâncias agressivas, rompe-se a película e poderá ocorrer: uma diminuição da secção do aço (ou converte-se totalmente em óxido); fissuração do betão e destacamento devido às pressões exercidas pelo óxido ao expandir, permitindo penetração de agentes agressivos; diminuição da aderência armadura/betão, reduzindo a capacidade de carga.

Sendo um processo eletroquímico, o mecanismo de corrosão necessita de diversos agentes a intervir, como exemplifica a Figura 2.16:

1. Um ânodo, onde ocorre a oxidação, que será a zona despassivada da armadura;
2. Um cátodo, onde ocorre a redução, que será a zona da armadura despassivada com acesso ao oxigénio;
3. Um condutor metálico/elétrico, por onde passará a corrente elétrica na forma de fluxo de eletrões, que neste caso será o aço;
4. Um eletrólito, no caso será o betão, por onde a corrente elétrica é gerada pelo fluxo de iões no meio aquoso.

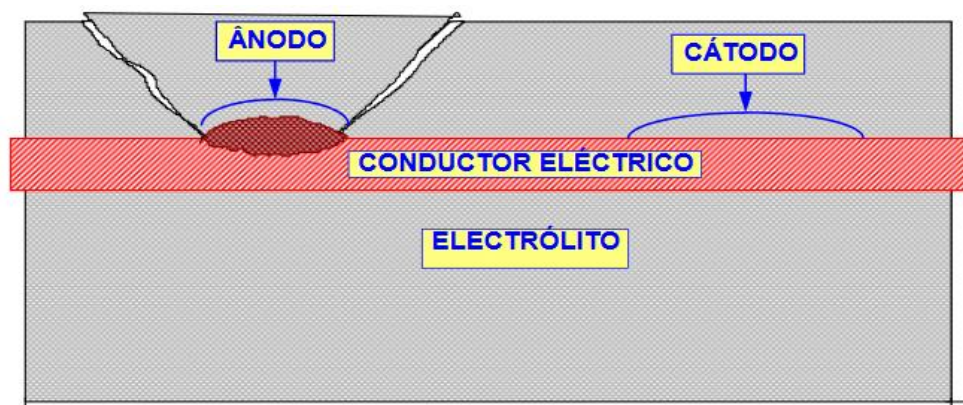


Figura 2.16 - Esquema representativo do processo eletroquímico de corrosão (Costa, 1997)

De uma forma generalizada, o aço corrói devido à reação anódica que permite que se dissolva como ião ferroso. Deve haver uma reação catódica simultânea, como a redução do oxigénio, tudo isto sempre na presença da água.

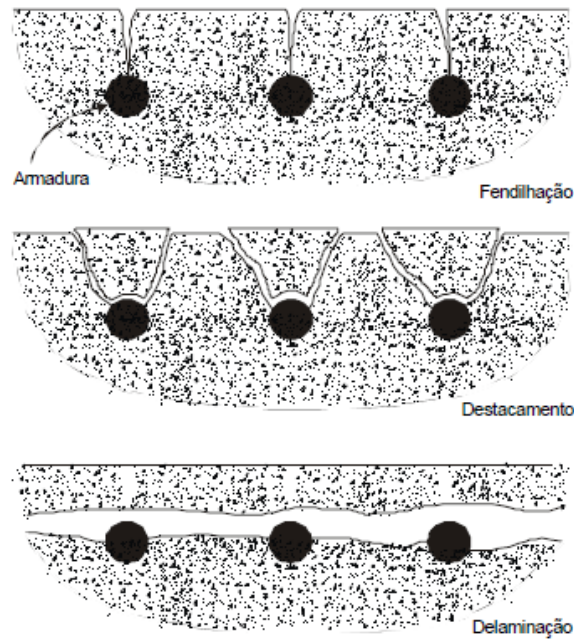


Figura 2.17 – Exemplo do tipo de degradação causado pela corrosão (Ferreira, 2000)

Os iões Fe^{2+} carregados positivamente junto do ânodo passam para a solução, enquanto que eletrões e^- , carregados negativamente, atravessam do aço para o cátodo onde são absorvidos pelos constituintes do eletrólito e combinam com a água e oxigénio para formar iões de hidróxido (OH^-). Estes iões atravessam o eletrólito e combinam com os iões de ferro para formar hidróxido férrico, que é mais tarde convertido em ferrugem após mais oxidação. Os efeitos que a corrosão pode induzir num elemento de betão são apresentados na Figura 2.17.

É importante referir, que o processo de corrosão ocorre mediante algumas condições, apresentadas no Quadro 2.6, das quais são exceções os ambientes secos (não há tanta condutividade do betão) ou saturados, pelo que no caso de uma estrutura portuária as zonas mais afetadas por este fenómeno são as zonas de maré e salpicos, contrariamente à zona submersa onde não há oxigénio (cátodo) para se dar a reação da Figura 2.18.

Para que haja corrosão	
pH < 8.0	Oxigénio e água
pH > 8.0	Oxigénio, água e cloro
Para que não haja corrosão	
Retirar do betão armado um dos seguintes:	Oxigénio, água ou cloro
Colocar no betão armado um dos seguintes	Iões hidróxido, iões ferrosos, inibidores ou potencial negativo sobre o aço

Quadro 2.6 - Resumo das condições necessárias para ocorrência de corrosão (Ferreira, 2006)

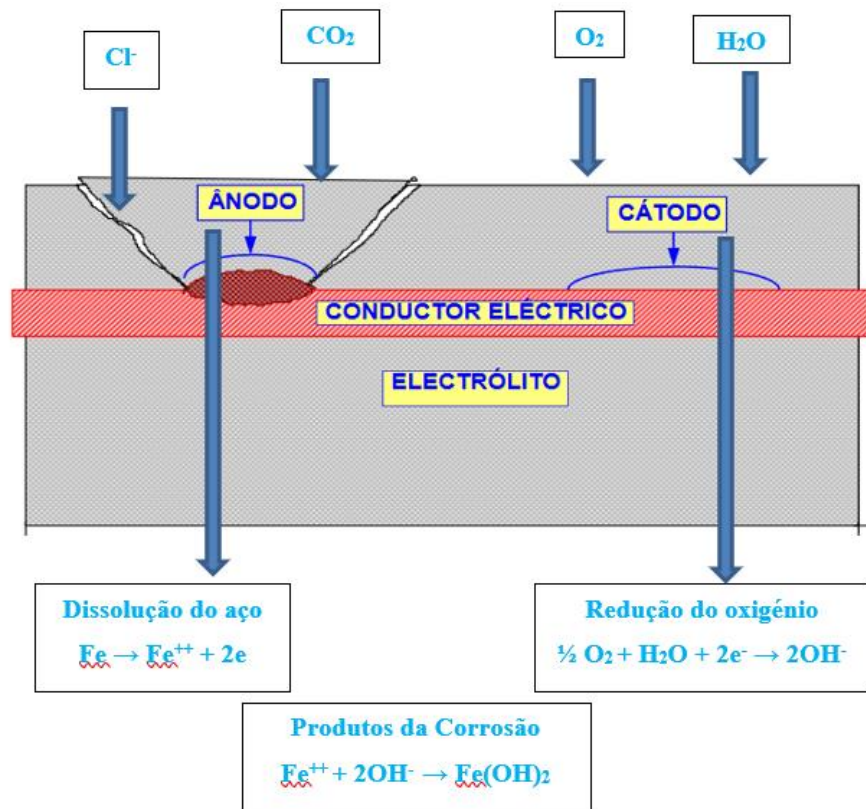


Figura 2.18 - Esquema do mecanismo de corrosão (adaptado de Costa, IST)

Um dos aspetos que condiciona a durabilidade das estruturas de betão é a velocidade com que se desenvolve a corrosão no elemento de betão armado. A velocidade de corrosão é condicionada pela resistividade do betão. Outro fator é o acesso das armaduras ao oxigénio, que no caso de ocorrer carbonatação, deixa de ser uma limitação. Os cloretos, que já foram analisados anteriormente, aparecem aqui como elemento agressivo pois aumentam a condutividade do betão e atuam como catalisador das reações nas zonas anódicas. A sua penetração no betão pode ser por difusão ou absorção e a melhor forma de o evitar é através de um betão de recobrimento com qualidade e espessura suficientes de modo a que os iões de cloro demorem a penetrar e instalem-se na armadura. Outra forma de proteger da corrosão será a introdução de sílica de fumos na massa de cimento ou a substituição de uma percentagem de cimento por cinzas volantes.

A corrosão pode ser manifestada por várias formas, como por exemplo, corrosão por picada. Este tipo de corrosão tem origem na desagregação da película passiva por intermédio dos cloretos provindos meio exterior ou presentes na amassadura do betão. É uma forma de corrosão extremamente localizada, não provocando quaisquer danos no material circundante, que ocorre maioritariamente nos aços inoxidáveis, o que a configura como um dos tipos de corrosão mais indesejáveis.

Outra forma de se apresentar é do tipo corrosão uniforme, que consiste no ataque de toda a superfície metálica em contacto com o meio corrosivo, com a consequente diminuição homogénea da sua espessura. Sendo de fácil deteção e monitorização, os efeitos deste tipo de corrosão podem ser reparados e/ou podem ser estimados, quantificando a perda de espessura ou de massa. Este tipo de corrosão é preferível sob o ponto de vista técnico a nível de projeto, já que o dimensionamento estrutural pode ser efetuado por excesso, para que durante o seu tempo de serviço sejam preservadas as suas funções a nível de resistência mecânica e dimensional.

Segundo Santos (2014), também a corrosão galvânica é um processo resultante do contacto elétrico entre metais diferentes. Na presença de um eletrólito torna-se um processo eletroquímico, no qual um metal

sofre corrosão preferencialmente em relação a outro. No caso do aço no betão, dar-se-á de cada vez que uma das zonas se danificar ou se não houver a formação da película passiva. Esta última zona atua como ânodo e a camada passiva como cátodo.

Existem muitas outras formas, como interesse de referência, como corrosão uniforme (Figura 2.19), corrosão por filiforme, sob tensão, por correntes de interferência, microbiológica, intersticial, etc.



Figura 2.19 - Exemplo de corrosão uniforme (Tiago Santos, 2014)

2.3.2.9. Betões Especiais

Este subcapítulo contempla a descrição de alguns tipos de betão com diversas utilizações da engenharia civil, nomeadamente betão pré-esforçado, pré-fabricado, maciço, auto-compactável, betão leve, ciclópico, entre outros.

- **Betão pré-esforçado**

Segundo Appleton (2005), as vantagens da utilização de pré-esforço destacam-se quando se quer vencer vãos maiores, diminuir peso próprio, maiores esbeltezas, melhor comportamento em serviço. O aço utilizado no pré-esforço é de alta resistência e é colocado em tensão antes ou depois do betão endurecer, neste caso, com recurso a dispositivos mecânicos de fixação das armaduras (ancoragens). A Figura 2.20 é um exemplo de um elemento de betão pré-esforçado.



Figura 2.20 - Exemplo de betão pré-esforçado (www.engenhariacivil.com)

Assim, um elemento em betão pré-esforçado, quando comparado com um elemento equivalente em betão armado, apresenta tensões de compressão (impostas pelo sistema de pré-esforço) mais elevadas, o que conduz a um aumento significativo da sua carga de fendilhação e a uma redução considerável da sua deformação. O betão pré-esforçado pode ser usado como reforço estrutural ativo de estruturas já existentes, reduzindo deformações, tensões e fendilhação na estrutura, podendo ser aplicado pelo exterior. Tal aplicação permite monitorizar e corrigir o elemento estrutural em serviço, nomeadamente ajustando o nível de pré-esforço do aço em serviço. Por outro lado, esta técnica poderá causar alguns problemas de corrosão às armaduras de pré-esforço.

Preto (2014) afirma que no reforço de estruturas de betão com pré-esforço exterior deve-se ter em conta tanto o betão já existente, como o que será colocado para acomodar os dispositivos de pré-esforço exterior. Para a caracterização do betão pré-existente é necessário aferir o seu estado de conservação e conhecer a sua resistência.

A avaliação da integridade do betão e a sua caracterização mecânica podem ser efetuadas recorrendo a ensaios não destrutivos que permitam a deteção e medição da largura de fendas; a avaliação da dureza superficial com esclerómetro de Schmidt; a determinação da resistência à compressão do betão com ensaio de carotes; a aferição da profundidade de carbonatação; e, se relevante, a determinação da penetração de cloretos. Caso o betão se encontre degradado em certas zonas, por exemplo com elevada fendilhação devido à carbonatação ou ao elevado teor de cloretos, é normal proceder-se a reparações localizadas. Estas consistem, em termos gerais, na remoção do betão degradado, na limpeza das armaduras e possível aplicação de uma pintura de proteção à corrosão destas, e no enchimento com argamassa de reparação.

Por fim, é importante referir que estruturas inseridas em ambientes excepcionalmente agressivos, como por exemplo o ambiente marítimo, poderão requerer a adoção de medidas de proteção especiais, devendo esta análise ser feita caso a caso. Estas medidas poderão passar pela preconização de uma maior espessura de betão de recobrimento ou a redução da sua permeabilidade, utilização de bainhas perfeitamente seladas, instalação de aparelhos de monitorização do estado de corrosão dos cabos, a adoção de cordões especiais ou a execução de uma camada protetora da secção de betão.

○ **Betão pré-fabricado**

A pré-fabricação de edifícios surge na Europa, após a II Guerra Mundial, como forma de resposta rápida à falta de habitação nos países mais destruídos. Foi pensada para diminuir prazos e racionalizar recursos, tornando-se economicamente atrativo, também pela necessidade de menos homens na obra. Na atualidade aplicamos este método construtivo a produtos e soluções estruturais que vão desde pisos de habitação às pontes de médio vão. O comportamento estrutural das soluções pré-fabricadas em betão, em particular das ligações, tem sido alvo de investigação, o que, em conjunto com a experiência da indústria, se têm refletido na melhoria da qualidade das ligações utilizadas atualmente. Uma vez que são produzidos fora do local de montagem e, devido à impossibilidade de transporte e manuseamento de elementos estruturais de grandes dimensões, as ligações assumem uma grande importância no âmbito do comportamento estrutural e como tal, devem igualmente cumprir certas propriedades físicas e mecânicas como a resistência mecânica, a durabilidade, ductilidade, resistência ao fogo, etc., tal e qual as estruturas betonadas *in situ*.

Segundo Saraiva (2012), a indústria da pré-fabricação em Portugal tem vindo a crescer recentemente embora a um ritmo inferior quando comparado com o resto da Europa. Isto deve-se a vários factores entre os quais o custo mais reduzido da mão-de-obra, onde inclusivamente se apresenta uma comparação entre várias soluções no Quadro 2.7.

As soluções pré-fabricadas, quando comparadas com soluções betonadas *in situ*, apresentam diversas vantagens, entre as quais se distinguem: a possibilidade da redução global dos custos, devido ao menor

número de operações em obra; às menores necessidades de cofragem e escoramentos no processo construtivo; à segurança durante a construção; ao menor impacto em termos de ambiente.

Também devido à necessidade de aumentar a velocidade da produção em fábrica são utilizados betões com características mecânicas e de durabilidade superiores aos utilizados nas construções tradicionais o que permite uma maior qualidade e longevidade das construções pré-fabricadas, quando comparadas com outras soluções.

Uma das debilidades desta solução é a falta de legislação.

Comparação de Preços

	In situ	Vigas T90	Vigas U120
Pré-fabricado	0%	74%	84%
Cimbre	47%	4%	0%
Cofragem	10%	1%	0%
Betão	17%	11%	8%
Armadura	17%	10%	8%
Pré-esforço	8%	0%	0%
Preço m ²	243,5 €/m ²	141,0 €/m ²	189,0 €/m ²

Quadro 2.7 – Comparação de preços de 3 soluções (duas pré-fabricadas e uma “in situ”) para uma passagem inferior de 3 vãos (Filipe Saraiva, IST, 2012)

A utilização desta solução tem particular interesse em obras marítimas e portuárias devido à dificuldade de betonar elementos submersos. A maior parte dos cais são construídos sob a forma de elementos de betão pré-fabricados ou betonados sob plataformas flutuantes. Sabe-se através do site da Etermar que, por exemplo, o cais do Porto de Bata (Guiné Equatorial) é uma estrutura gravítica em caixotes de betão armado pré-fabricado com 870 m de comprimento. Também na Guiné Equatorial, o terminal *multipurpose* e roll-on rol-off de Malabo, representado na Figura 2.21, é constituído por caixotões em betão armado, previamente construídos sobre doca flutuante. Nesse mesmo porto o terminal de contentores e misto foram construídos com caixotões de betão armado de 23,65 x 1,75 x 19,00 metros também pré-fabricados em doca flutuante. Em Portugal, na construção do novo Cais de Cruzeiros do Funchal, os caixotões foram pré-fabricados sobre doca flutuante no Porto de Caniçal e posteriormente rebocados e afundados sobre cama de enrocamento no Porto do Funchal. Foram construídos 17 caixotões de 4 tipos diferentes com uma altura de 12,50 m, destacando-se 6 caixotões de 20X15 m com paredes perfuradas para dissipação da energia das ondas. A superestrutura do cais e o muro de coroamento foram betonados *in situ*. Esta obra contemplou um total de volume de betão de 50756 m³. Também a empreitada correspondente à primeira fase do Terminal de Cruzeiros de Leixões contemplou a construção de um novo cais de cruzeiros para a acostagem de navios até 300 metros de comprimento, um cais fluvio-marítimo e um porto de recreio náutico para 170 embarcações. O cais para cruzeiros é uma ponte cais com 340m de comprimento, construída com elementos pré-fabricados sustentado por estacas com 1.000 mm de diâmetro em betão armado de camisa metálica perdida encastradas no fundo rochoso. Um outro exemplo de pré-fabricação são os caixotões celulares usados no molhe Norte do Douro.



Figura 2.21 - Exemplo de caixotões pré-fabricados para a construção de cais no porto de Malabo, Guiné Equatorial (Etermar, 2018)

○ **Betão leve**

Segundo Brito e Flores (2005), e como o próprio nome sugere, este betão apresenta uma massa volúmica inferior ($<1800 \text{ kg/m}^3$). Os agregados leves que o compõem podem ter origem natural, em materiais vulcânicos como a pedra-pomes, ou origem artificial, resultante de processos térmicos. Um dos inconvenientes destes agregados reside no facto de estes apresentarem uma estrutura porosa muito acentuada. A leveza originada pelos vazios existentes neste tipo de betão melhora uma das piores características do betão convencional, que é o isolamento térmico. A sua aplicação está associada a uma relação resistência-densidade, ou seja, para o mesmo nível de resistência, um decréscimo da densidade permite reduzir o peso próprio da estrutura. Este betão tem muita utilização em elementos pré-fabricados pelas características que apresenta: leveza, isolamento, fácil trabalhabilidade após endurecimento (enchimentos). Como elemento estrutural não é tão utilizado devido à fraca resistência. Nesta categoria destacam-se alguns betões como por exemplo:

1. Betão de argila expandida: produzido substituindo-se os agregados de pedra por agregados de argila expandida. A argila expandida resulta da cozedura a alta temperatura de argila que expande sob a forma de grãos arredondados. Estes betões apresentam massa volúmica na ordem dos 600 a 1000 kg/m^3 .
2. Betão sem finos: de forma simplista, é um betão sem areias. Daqui resultam ótimas propriedades térmicas e acústicas.
3. Betão celular: é um betão onde se incorporam células esféricas com diâmetros entre 0.1 e 0.3 mm que não comunicam entre si. A sua massa volúmica varia entre 300 a 1200 kg/m^3 também sendo um bom isolador térmico e acústico.

○ **Betão pesado**

Os betões pesados apresentam-se com massa volúmica superior a 2500 kg/m³. São utilizados como forma de conferir proteção às radiações (edifícios que emitam radiações). Betões refratários e super-refratários são exemplos de betões pesados.

O betão corrente não resiste a temperaturas superiores a 200/300°C, começando a perder as suas características, podendo inclusive desfazer-se porque os constituintes hidratados do cimento Portland perdem a sua água de constituição. Perante a necessidade da indústria para dispor de um betão que apresente um bom comportamento a elevadas temperaturas, fabricam-se hoje uma larga gama de betões refratários e super-refratários que se distinguem do betão convencional em alguns aspetos. Por um lado, os ligantes são cimentos aluminosos em vez do cimento Portland, por outro, os agregados são granulados refratários como rochas naturais (basalto), argila cozida com pó de tijolo e areia siliciosa, silimanite, etc.

○ **Betão de elevado desempenho**

Os betões de elevado desempenho exibem, em geral, retração elevada nas primeiras idades e desenvolvem apreciável calor de hidratação. Estes aspetos poderão ser ultrapassados recorrendo a uma cura adequada e a uma cuidada seleção do ligante. Estes betões têm uma maior resistência à tração do que os convencionais, embora não se verifique uma diferença relativa tão grande como a que ocorre na resistência à compressão. É implícita a noção de que os betões de elevado desempenho são, em geral, mais duráveis que os betões convencionais, seja pela maior compacidade da sua estrutura seja pelos maiores cuidados que se devem ter na sua produção, aplicação e cura.

Este tipo de betão é mais suscetível ao ataque do fogo do que os betões convencionais devido ao destacamento explosivo dos recobrimentos. Outro aspeto a ter em conta é a maior probabilidade de ocorrência de reações álcali-sílica devido à grande dosagem de cimento, no entanto, este aspeto pode ser atenuado com recurso a sílica de fumo ou cinzas volantes.

A aplicação destes betões é diversa, nomeadamente pontes com grandes vãos, edifícios muito altos, elementos pré-fabricados e estruturas marítimas, onde se exige uma maior durabilidade do betão e classes de resistência maiores.

Consideram-se betões de alta resistência aqueles betões com níveis de resistências à compressão acima dos 60 MPa, com características específicas (relação água / cimento baixa, escolha de agregados - granulometria e resistência, uso de partículas finas, uso de plastificantes, escolha do tipo e dosagem de cimento e cura apropriada).

Focaliza-se, em geral, as características de um betão de elevado desempenho na sua alta resistência e durabilidade, mas também se podem referir às características do estado fresco, como sejam a facilidade de colocação, elevada resistência à segregação, longa manutenção da trabalhabilidade, baixa exsudação e aderência quando projetado, entre outras.

Destaca-se também nesta categoria, os betões de alta densidade utilizados em obras marítimas, como por exemplo no molhe sul do Douro que têm a particularidade de usar agregados mais pesados

Também o recurso a fibras nos betões pretende aumentar a ductilidade do conjunto, uma vez que os betões de elevado desempenho têm rotura frágil. A adição de fibras procura diminuir a micro-fissuração e incrementar a baixa resistência à tração do betão. As fibras mais utilizadas para a produção destes tipos de betão são as de aço, existindo também as fibras de vidro, de polipropileno e outras. A utilização mais comum para o betão com fibras é nos pavimentos industriais, por estarem sujeitos a grandes esforços e desgaste, embora existam outros exemplos.

Ainda na categoria de betões de elevado desempenho, podem-se incluir os betões auto-nivelantes (auto-compactáveis) que são usados nas situações em que é impossível fazer a sua compactação pelos métodos usuais, sem que seja afetado pela qualificação da mão-de-obra durante a sua colocação e que não requeira qualquer tipo de vibração ou compactação mecânica. O betão auto-compactável é compactado

graças ao seu peso próprio, em qualquer tipo ou forma de cofragem, e sem segregação ou agregação, obrigando a uma escolha adequada dos constituintes. As suas vantagens incidem num melhor envolvimento das armaduras, enchendo todos os espaços; diminuição de recursos humanos e equipamentos e aumento da rapidez de aplicação. As desvantagens têm a ver com uma maior dosagem de ligante e da aplicação de adjuvantes especiais, que o encarece.

○ **Betão ciclópico**

O betão ciclópico consiste na adição de pedras de grandes dimensões, arrumadas à mão numa proporção da ordem dos 30% a 40% do volume do betão, sendo o restante preenchido com betão corrente. Na prática, começa-se com uma camada de betão corrente, seguindo-se (colocada à mão ou com grua) uma série de pedras de grandes dimensões, de forma irregular convenientemente intervaladas, sendo esse intervalo função do diâmetro da brita do betão corrente. Cobre-se estas pedras com uma camada de betão corrente, torna-se a colocar nova série de pedras grandes e assim sucessivamente. Por norma, as resistências destes betões são menores do que as dos betões correntes. Este tipo de betão está atualmente em desuso, aplicando-se em grandes maciços de fundação, devido ao volume necessário e por questões económicas.

○ **Betão arquitetónico**

Este betão permite dar resposta a imposições arquitetónicas que a aparência do betão convencional não consegue dar. A sua versatilidade, associada a um comportamento estável e de grande durabilidade, comparativamente a materiais alternativos, permite oferecer a um baixo custo, soluções diferentes e inovadoras. Atualmente, conseguem-se acabamentos bastante lisos e uniformes, de várias tonalidades e cores no uso do betão. Tais propriedades só se consegue com a escolha adequada dos materiais, o tipo de cofragem, o tempo de descofragem, o tipo de agregados, a cor de certos aditivos ou da areia.

- **Betão branco:** o betão branco é um material cujas potencialidades, em termos da apetência estética e capacidade estrutural, somente são atingidas quando se assume uma adequada prescrição e controlo de etapas fundamentais nas diferentes fases do processo, que se estendem da conceção à aplicação. Ao nível do projeto de arquitetura, a definição criteriosa da textura e do acabamento superficial condiciona a tecnologia e os custos da solução. Ainda nesta fase devem ser previstas as juntas de cofragem e o tratamento de juntas de betonagem. Um exemplo desta aplicação é apresentado na Figura 2.22.

Relativamente ao projeto estrutural, conseguem-se resistências elevadas devido às classes de cimento disponíveis, às dosagens necessárias e às baixas relações água-cimento, tudo isto de modo a conferir a compacidade necessária para superfícies expostas. Em termos técnicos, devem-se adotar resistências superiores a C30/37, o recobrimento deve ser 1 cm superior em relação aos betões correntes e as cofragens também respeitar os acabamentos desejados.

Quanto à produção, os materiais constitutivos devem ser escolhidos e lavados, com especial incidência na tonalidade e limpeza dos mais finos; a introdução de filer irá funcionar como melhoramento da compacidade do betão; caso se pretenda um nível de brancura muito elevado, devem-se recorrer a pigmentos, como o dióxido de titânio, encarecendo significativamente o betão; todos os equipamentos devem ser afetos à produção deste betão ou devidamente lavados.

Ao nível da preparação, aplicação, cura e proteção devem ser contabilizados alguns cuidados, como a limpeza das cofragens e uso de desmoldantes parafínicos; o tratamento com recurso a pintura de proteção pode ser requerida; o ritmo de colocação e vibração tem de ser contínuo e por camadas não superiores a 0.50 m; à semelhança dos betões convencionais, a cura e proteção do betão nas primeiras idades, são fatores importantes face à sua durabilidade e aspeto final.

Em ambientes marítimos não é aconselhável a utilização deste tipo de betões pois trata-se de um ambiente agressivo, nomeadamente, água do mar e presença de gaivotas, que aceleram o processo de degradação.



Figura 2.22 – À esquerda: edifício de betão branco em Porto Alegre (Brasil) projetado pelo arquiteto Siza Vieira (www.tecnosilbr.com.br) ; À direita: edifício da Vodafone no Porto em betão à vista (Secil)

- Betão colorido: o betão colorido obedece às mesmas regras de produção que o betão convencional sendo que algumas são esquecidas, surgindo defeitos escondidos por revestimentos. O betão colorido é uma solução estética económica, fácil de obter e versátil. O acréscimo de custo é compensado pela omissão de outros tradicionais revestimentos e, conseqüente redução de prazos na obra. As opções disponíveis para condicionar a cor do betão são: coloração integral de todo o volume do betão durante a amassadura, aplicação de um endurecedor pigmentado à superfície do betão durante a sua fase plástica, formando uma ligação monolítica (solução válida apenas para superfícies próximas da horizontal), e coloração do betão existente por reagentes químicos penetrantes. Para se obter um bom resultado na coloração integral, são indispensáveis a seleção do adjuvante adequado e a participação do projetista, do fornecedor do betão e do empreiteiro.

Os adjuvantes permitem uma cor uniforme, permanente e facilmente reproduzível; o produto escolhido deve garantir a uniformidade dos resultados e deve manter o aspeto ao longo do tempo, sem descoloração ou deterioração. À semelhança do betão branco devem ser previstas juntas de betonagem e os mesmos cuidados no que diz respeito à descofragem, com o pormenor que deve ser lavado no final da descofragem para remover produtos descofrantes e, em seguida, aplica-se um produto hidrófugo de alta qualidade.

- Betão à vista: o emprego deste betão justifica-se por razões de economia, prazos de execução e estética. Ultimamente, o uso de fibras misturadas na massa de betão foi fundamental para conseguir melhores acabamentos. As fibras metálicas, de nylon, de vidro, de polipropileno são doseadas juntamente com o cimento para diminuir a quantidade de agregados e assim conseguir elementos mais finos e regulares. Como produto final podem-se obter várias texturas e até intensidades de brilho. Apresenta-se um exemplo na Figura 2.22.

3

DURABILIDADE E TIPOLOGIAS DE ESTRUTURAS MARÍTIMAS EM BETÃO

3.1. ENQUADRAMENTO DO CAPÍTULO

Neste capítulo pretende-se evidenciar a utilização do betão em diversas estruturas marítimas e descrever alguns fatores que condicionam a durabilidade dessas estruturas, tendo em conta os ataques a que estão sujeitas, referidos no capítulo anterior. Ao longo do capítulo também serão referidos alguns modelos de previsão de durabilidade, e algumas práticas aplicadas na construção de estruturas marítimas (portos, quebramares, esporões, etc.)

3.2. DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS MARÍTIMAS EM BETÃO

No capítulo anterior caracterizou-se o ambiente marítimo e comprovou-se a agressividade do meio, nomeadamente a água do mar e a sua interação com outros efeitos (temperatura, vento, exposição solar) e com as estruturas marítimas.

De acordo com Costa (1997), a durabilidade de uma estrutura é avaliada se estas forem projetadas e construídas com o objetivo de satisfazer um conjunto de requisitos funcionais durante o seu período de vida útil sem causar custos inesperados de manutenção e reparação.

Neste contexto é necessário atuar ao nível de projeto, execução, exploração e manutenção pelo que nestas diferentes fases são diversos os intervenientes.

No caso do dono de obra este deverá:

- Especificar o uso, período de vida útil e os requisitos para o projeto e obra;
- Assegurar o controlo de qualidade;
- Assegurar inspeções e ensaios durante e após a execução da obra.

Também o projetista tem funções como:

- Identificar as condições de exposição ambientais;
- Conceber a estrutura (estrutura e geometria);
- Especificar os materiais e recobrimentos;
- Definir os critérios de projeto (controlo da fendilhação, assentamentos, etc.);
- Definir eventuais medidas de proteção adicional;
- Estipular um manual de manutenção.

O empreiteiro deve:

- Executar a estrutura de acordo com os requisitos especificados no projeto;
- Controlar a composição do betão (razão A/C, tipo de cimento, agregados, etc.);
- Controlar a betonagem e cura do betão;
- Controlar os recobrimentos;

O utilizador tem igual responsabilidade no que diz respeito à durabilidade da estrutura:

- Inspeção e avaliação do comportamento;
- Manutenção;

Existem deficiências tanto ao nível de projeto como de execução que afetam diretamente a durabilidade das estruturas.

Ao nível do projeto podem-se enumerar a especificação inadequada dos materiais; especificação deficiente dos recobrimentos das armaduras; deficiente previsão de deformações impostas (retração e temperatura); deficiente controlo da fendilhação e deformação; errada pormenorização de armaduras; conceção inadequada (forma, drenagem, juntas, etc.).

Quanto à execução uma seleção inadequada dos materiais que compõem o betão, cofragens deficientes, posicionamento das armaduras, inadequada colocação, compactação e cura do betão são alguns dos fatores que têm impacto na durabilidade da estrutura.

Com efeito existem outras condicionantes à durabilidade do betão com impactos diretos no período de vida útil de estruturas marítimas que já foram referidos no capítulo anterior, sendo que nestes ambientes marítimos predominam os ataques físicos, químicos e biológicos (ataque de cloretos, carbonatação, ciclos de gelo/degelo, erosão, ataque álcali-agregado, ataque por sulfatos, etc.).

No caso de uma estrutura marítima sujeita a oscilações de maré também são distintas as zonas de deterioração, igualmente explicado no capítulo anterior.

Com base nas responsabilidades incutidas ao projetista, a definição do ambiente ao qual se vai expor a estrutura tem grande influência na durabilidade desta. A Norma NP 206-1 2007 especifica as diferentes classes de exposição associadas a uma breve descrição dos ambientes envolventes tal como se apresenta nos Quadros 3.1 a 3.6.

- Sem risco de corrosão ou ataque

Classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos de condições em que poderão ocorrer as classes de exposição
X0	Betão sem armadura ou elementos metálicos embebidos: todas as exposições excepto em situação de gelo/degelo, abrasão ou ataque químico Betão com armadura ou elementos metálicos embebidos: muito seco	Betão enterrado em solo não agressivo Betão permanentemente submerso em água não agressiva Betão com ciclos de molhagem/secagem não sujeito a abrasão, gelo/degelo ou ataque químico Betão no interior de edifícios com uma humidade do ar ambiente muito baixa Betão armado em ambiente muito seco

Quadro 3.1 - Quadro representativo das classes sem risco de corrosão ou ataque (Norma NP 206-1 2007)

- Corrosão induzida por carbonatação

Classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos de condições em que poderão ocorrer as classes de exposição
XC1	Seco ou permanentemente húmido	Betão no interior de edifícios com uma humidade do ar ambiente baixa Betão permanentemente submerso em água
XC2	Húmido, raramente seco	Superfície de betão sujeita a contacto prolongado com água não agressiva Betão armado enterrado em solo não agressivo
XC3	Humidade moderada	Betão no interior de edifícios com uma humidade do ar ambiente moderada ou elevada (por exemplo cozinhas e casas de banho) Betão exterior protegido da chuva transportada pelo vento
XC4	Alternadamente húmido e seco	Superfícies de betão sujeitas a contacto com água, não incluídas na classe de exposição XC2 Superfícies de betão expostas à chuva Betão armado exposto a ciclos de molhagem/secagem

Quadro 3.2 - Quadro representativo das classes em risco de corrosão por carbonatação (Norma NP 206-1 2007)

- Corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar

Classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos de condições em que poderão ocorrer as classes de exposição
XD1	Humidade moderada	Superfícies de betão expostas a cloretos transportados pelo ar Betão armado em partes de pontes afastadas da ação directa dos sais descongelantes, mas expostas a cloretos transportados pelo ar
XD2	Húmido, raramente seco	Piscinas Elementos de betão expostos a águas contendo cloretos
XD3	Alternadamente húmido e seco	Betão armado directamente afectado por sais descongelantes ou pelos salpicos de água contendo cloretos Betão armado em que uma superfície está imersa em água contendo cloretos e a outra exposta ao ar (por exemplo algumas piscinas ou parte delas) Pavimentos Lajes de parques de estacionamento

Quadro 3.3 - Quadro representativo das classes em risco de corrosão por cloretos não oriundos da água do mar (Norma NP 206-1 2007)

- Corrosão induzida por cloretos da água do mar

Classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos de condições em que poderão ocorrer as classes de exposição
XS1	Exposto ao sal transportado pelo ar mas não em contacto directo com a água do mar	Estruturas próximas da costa ou na costa Betão armado em ambiente marítimo saturado de sais Betão armado em áreas costeiras perto do mar, directamente exposto e a menos de 200 m do mar (esta distância pode aumentar até 1 km nas costas planas e foz de rios)
XS2	Permanentemente submerso	Elementos de estruturas marítimas Betão armado permanentemente submerso
XS3	Zonas sujeitas aos efeitos das marés, da rebentação e da neblina marítima	Elementos de estruturas marítimas Betão armado sujeito às marés ou aos salpicos desde 10 m acima do nível superior das marés (5 m na costa Sul de Portugal Continental) até 1 m abaixo do nível inferior das marés Betão armado em que uma das superfícies está imersa em água do mar e a outra exposta ao ar (por exemplo em túneis submersos ou abertos em rocha ou solos permeáveis no mar ou em estuários de rios). Esta exposição exigirá muito provavelmente medidas de protecção suplementares

Quadro 3.4 - Quadro representativo das classes em risco de corrosão por cloretos presentes na água do mar (Norma NP 206-1 2007)

- Risco de ataque pelo gelo/degelo com ou sem produtos descongelantes

Classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos de condições em que poderão ocorrer as classes de exposição
XF1	Saturação moderada em água ou moderado número de ciclos de gelo/degelo, sem produto descongelante	Superfícies verticais de betão expostas à chuva e ao gelo Superfícies não verticais de betão expostas à chuva e ao gelo
XF2	Saturação moderada em água ou moderado número de ciclos de gelo/degelo, com produto descongelante	Superfícies verticais de betão de estruturas rodoviárias expostas ao gelo e a produtos descongelantes transportados pelo ar Betão, tal como nas pontes, classificável como XF1, mas exposto aos sais descongelantes directa ou indirectamente
XF3 ^{''}	Saturação elevada em água, sem produtos descongelantes	Superfícies horizontais de betão expostas à chuva e ao gelo
XF4 ^{''}	Saturação elevada em água, com produtos descongelantes ou com água do mar	Estradas e tabuleiros de pontes expostos a produtos descongelantes Superfícies de betão expostas a pulverizações directas contendo produtos descongelantes e expostas ao gelo Zonas sujeitas aos efeitos da rebentação de estruturas marítimas expostas ao gelo

Quadro 3.5 - Quadro representativo das classes em risco de ataque gelo/degelo com ou sem produtos descongelantes (Norma NP 206-1 2007)

- Risco de ataque químico

Característica química	Método de ensaio de referência	XA1	XA2	XA3
		Ambiente químico ligeiramente agressivo	Ambiente químico moderadamente agressivo	Ambiente químico altamente agressivo
Águas				
SO ₄ ²⁻ mg/l	EN 196-2	≥ 200 e ≤ 600	> 600 e ≤ 3000	> 3000 e ≤ 6000
pH	ISO 4316	≥ 5,5 e ≤ 6,5	≥ 4,5 e < 5,5	≥ 4,0 e < 4,5
CO ₂ agressivo mg/l	prEN 13577:1999	≥ 15 e ≤ 40	> 40 e ≤ 100	> 100 até à saturação
NH ₄ ⁺ mg/l	ISO 7150-1 ou ISO 7150-2	≥ 15 e ≤ 30	> 30 e ≤ 60	> 60 e ≤ 100
Mg ₂ ⁺ mg/l	ISO 7980	≥ 300 e ≤ 1000	> 1000 e ≤ 3000	> 3000 até à saturação
Solos				
SO ₄ ²⁻ total mg/kg ⁽¹⁾	EN 196-2 ⁽²⁾	≥ 2000 e ≤ 3000 ⁽³⁾	> 3000 ⁽³⁾ e ≤ 12000	> 12000 e ≤ 24000
Acidez ml/kg	DIN 4030-2	> 200 Baumann Gully	Não encontrado na prática	

Quadro 3.6 - Quadro representativo das classes em risco de ataque químico (Norma NP 206-1 2007)

De facto, à semelhança do que foi explicado no Capítulo 2, uma estrutura marítima, mais frequentemente um cais, poderá estar sujeito a vários destes ataques de acordo com a oscilação de maré. Uma zona estará apenas sujeita a salpicos, outras a ciclos de molhagem/secagem e poderão até ocorrer ciclos de gelo/degelo (não tão comum em Portugal) em caso de temperaturas baixas. Também o ataque químico proveniente da própria água do mar (classe XA) faz com que resultem diferentes classes de exposição que deverão ser avaliadas em projetos deste tipo, como se mostra na Figura 3.1.



Figura 3.1 - Exemplo de diferentes classes de exposição numa estrutura marítima (Paulo Cachim, Universidade de Aveiro)

No Capítulo 2 constataram-se os diversos mecanismos de ataque a que o betão está sujeito, sendo que os de maior preocupação, no caso de uma estrutura inserida em ambiente marítimo, são os ataques do tipo carbonatação e por cloretos. Os cloretos são particularmente gravosos no caso de estruturas armadas e podem estar presentes tanto no meio ambiente como na mistura que deu origem ao betão, obedecendo a certos limites como se mostra no Quadro 3.7. No caso de ambiente marítimo a presença de cloretos é mais acentuada na água do mar, com a particularidade de poderem ser transportados a uma distância que poderá ir até 2 km dependendo da topografia e do vento.

Os mecanismos de transporte e intrusão dos cloretos nas estruturas marítimas são: por permeabilidade, ou seja, um gradiente de pressão entre o líquido e os poros; por absorção capilar quando a estrutura fica sujeita a ciclos de molhagem e secagem; por difusão e por migração que resulta de um gradiente elétrico. Esses mecanismos apresentam-se na Figura 3.2.

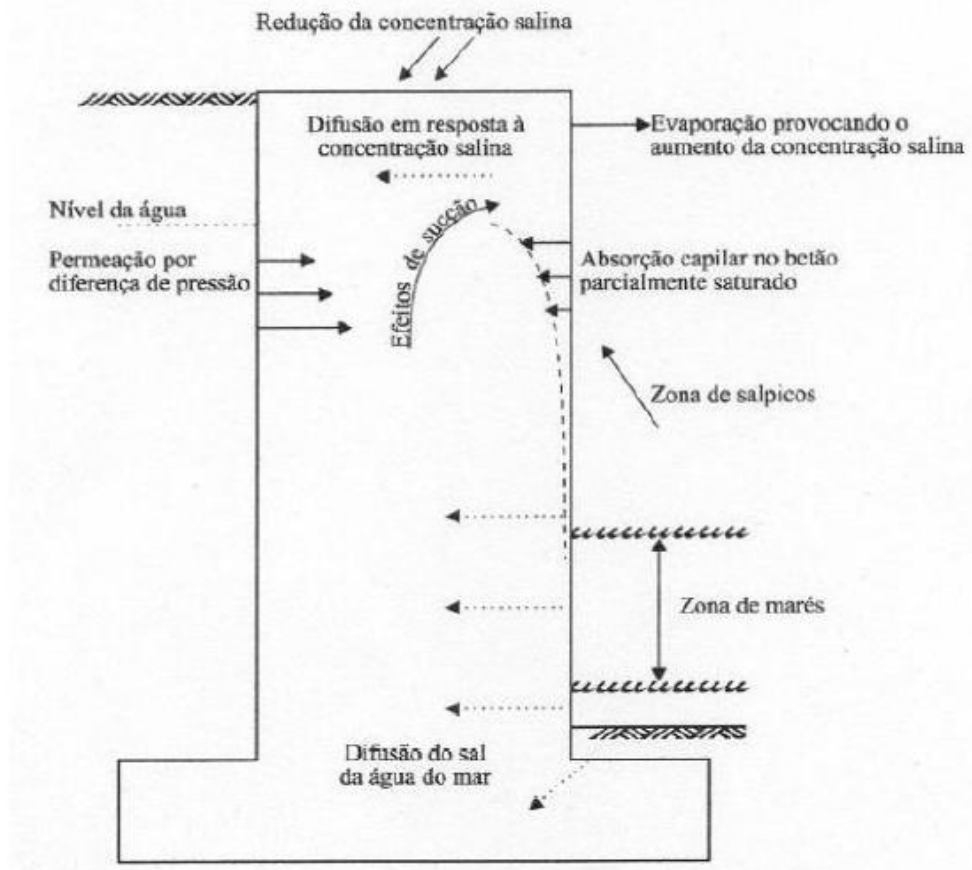


Figura 3.2 - Mecanismo de transporte de cloretos numa estrutura marítima (Rodrigues, 2011)

Classe	Classe	Teor máximo de Cl-por massa de cimento	Classe de exposição
Betão Simples	Cl 1,0	1,0%	XC, XF, XA, XS, XD
Com armaduras de aço ou outros metais	Cl 0,2	0,2%	XS, XD
	Cl 0,4	0,4%	XC, XF, XA
Com aço de pré-esforço	Cl 0,1	0,1%	XS, XD
	Cl 0,2	0,2%	XC, XF, XA

Quadro 3.7 - Quadro informativo do limite máximo de cloretos (adaptado de NP 206-1 2007)

Tendo em conta os vários intervenientes afetos a uma obra, a especificação do betão pretendido para a execução do projeto deverá obedecer a algumas regras que, caso não fossem estipuladas, poderiam condicionar a durabilidade do projeto. Para isso recomenda-se: uma explícita caracterização dos ambientes envolventes das várias partes da estrutura, identificando os agentes agressivos; dimensionar a estrutura, com base na classe de resistência definida; identificar a máxima dimensão do agregado, D_{max} , e a classe de consistência; especificar o betão no caderno de encargos; em caso de betões especiais devem ser adicionadas as classes de resistência à tração, massa volúmica, etc.; especificar recobrimentos e condições de cura; especificar requisitos para agregados ou acabamento superficial.

Uma correta especificação no caderno de encargos facilita a quantificação do custo da obra e a requisição do betão pela entidade construtora ou pelo subempreiteiro. Também o projetista terá mais garantias que o betão produzido e aplicado na obra estará de acordo com as necessidades estruturais e que a estrutura durará o previsto. Um exemplo de uma possível especificação é apresentada na Figura 3.3.

Cachim afirma que a especificação poderá ocorrer de diferentes formas:

- Betão de comportamento especificado: betão cujas propriedades e características são especificadas ao produtor, sendo este o responsável por fornecer um betão que satisfaça aquelas propriedades e características.
- Betão de composição prescrita: betão cuja composição e materiais constituintes são especificados ao produtor, sendo este responsável por fornecer um betão com a composição especificada. Devem ser especificadas as dosagens de cimento, razão água-cimento, categorias e teor máximo de cloretos dos agregados, máxima dimensão do agregado, origens dos adjuvantes ou adições, etc.
- Betão de composição prescrita em norma: betão cuja composição se encontra estabelecida numa norma válida no local de utilização do betão (ainda não existente em Portugal).

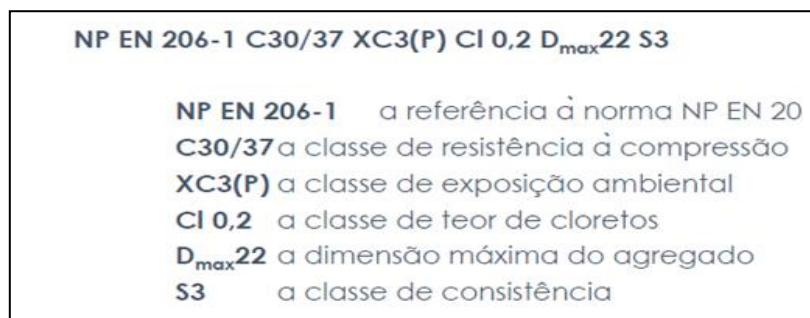


Figura 3.3 - Exemplo de betão comportamento especificado (Cachim)

3.3. MODELOS DE DURABILIDADE

O desenvolvimento de modelos que procuram estimar o tempo de vida útil de estruturas de betão tem tido particular interesse nos últimos anos. Para tal é necessário possuir um modelo de cálculo para cada mecanismo de deterioração de uma estrutura, bem como conhecer o ambiente envolvente a essa estrutura. Pereira (2016) afirma que para além de modelos determinísticos, podem também desenvolver-se modelos de índole probabilística. Neste último caso, é essencial incluir um modelo matemático e obter dados suficientes e relevantes sobre a variabilidade do modelo, algo que nem sempre é fácil de conseguir.

Geralmente a durabilidade de uma estrutura ou elemento é assegurada através de códigos com requisitos prescritivos como a NP-EN 206-1 (2007) norma pela qual se guia a especificação E465 do LNEC-Laboratório Nacional de Engenharia Civil (2007), em que os parâmetros são sobrestimados quando na mesma zona a construir existem registos de estruturas com deterioração precoce ou em ambientes extremamente agressivos.

Os conceitos de durabilidade estão muitas vezes associados ao desempenho da estrutura e ao tempo de vida útil e podem ser aplicados a diferentes níveis como estruturas e materiais. Os valores mínimos aceitáveis para o desempenho, ou os máximos aceitáveis para a degradação, são designados Estados Limite de Durabilidade. Na fase de projeto definem-se os requisitos de segurança e funcionalidade de

acordo com determinado tipo de estrutura e baseados nas solicitações a que está sujeita. Assim, entende-se por vida útil, o período para o qual a estrutura conserva os requisitos de segurança, funcionalidade e estética, sem custos de manutenção inesperados. O conceito de vida útil pode ser abordado por fatores técnicos, funcionais e económicos.

Os modelos de durabilidade podem ser de vários tipos, nomeadamente modelos de degradação, modelos de desempenho e modelos de vida útil em serviço.

Utilizando uma abordagem de desempenho, a estrutura ou componente da mesma é dimensionada de modo a que seja exigido o cumprimento de um desempenho mínimo durante toda a sua vida útil. O desempenho é avaliado através da verificação do comportamento da estrutura ou elemento da mesma e comparando-a aos requisitos de desempenho especificados. Com este tipo de metodologia é necessário manter um certo nível de desempenho e quando esse nível deixa de ser mantido chega-se ao fim de vida da estrutura.

3.3.1. MODELO PROBABILÍSTICO

Ferreira (2004) mostra que num modelo probabilístico começa-se por definir um estado limite, o qual a estrutura ou elemento não pode ultrapassar de modo a que seu desempenho seja superior a um mínimo estipulado. Um exemplo desse estado limite de utilização poderá ser a despassivação das armaduras provocada por um teor crítico de cloretos.

Regra geral, define-se uma função com base no estado limite de utilização da estrutura, considerando efeitos resistentes e ações aplicadas, tal como se apresenta na expressão abaixo.

$$R(X_1, X_2, \dots, X_i) - S(X_{i+1}, X_{i+2}, \dots, X_n) > 0$$

Onde,

- R - representa a capacidade resistente da estrutura
- S - representa as ações aplicadas sobre a estrutura
- X_i - variáveis

Tanto a capacidade resistente, como as ações aplicadas dependem do tempo e têm uma incerteza associada. A determinação do risco associado ao acontecimento de $R(t) < S(t)$ pode ser expressa como probabilidade de falha (rotura) do acontecimento, que genericamente pode ser:

$$p_f(t) = P (R(t) < S(t))$$

Ou,

$$p_f(t) = P [G(R,S,t) \leq 0]$$

Onde $G()$ é definido como o estado limite.

Pelo que foi exposto também se pode concluir que:

- Seguro ($S < R$): Se $R - S > 0$, significa que a estrutura está funcional. Doutra forma se $R - S = 0$, significa que é atingido o estado limite.
- Não seguro ($R > S$): Se $R - S < 0$, significa que a estrutura não está funcional.

As vantagens de definir um estado limite baseiam-se no facto de permitir boas bases de dimensionamento, para além de que facilita o planeamento de inspeção e manutenção. Com isto pode-se chegar a uma otimização económica se de facto, as ações de intervenção forem antecipadamente programadas.

Sendo um dos maiores problemas de deterioração e de durabilidade de uma estrutura, o mecanismo de corrosão é muitas vezes analisado com recurso a um modelo probabilístico. Não seria muito correto tentar fazer a análise com recurso a um modelo determinístico do caso, uma vez que é um processo complexo e são muitas as variáveis envolvidas (tempo, teor de cloretos, recobrimento, permeabilidade, etc.).

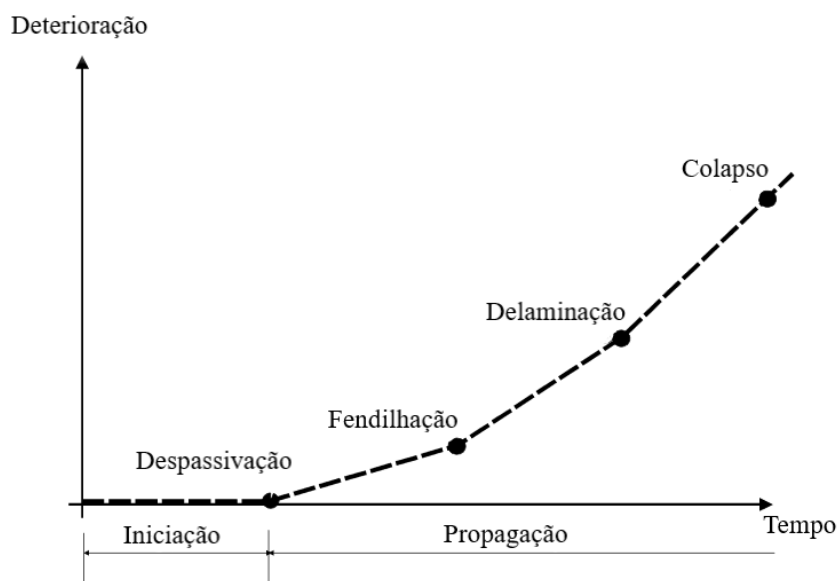


Figura 3.4 - Exemplo do desenvolvimento do estado limite de serviço de uma estrutura afetada por corrosão, modelo de Tuutti, 1999)

A corrosão é o mecanismo de deterioração mais gravoso para as estruturas de betão armado. Um dos modelos que o melhor define é o proposto por Tuutti (1982) e afirma que a corrosão é função do tempo e pode ser dividido em duas partes: iniciação e propagação, como se mostra na Figura 3.4. A fase de iniciação corresponde à penetração dos cloretos e ao momento em que estes atingem a armadura. A fase de propagação começa a partir da despassivação das armaduras e é mais duradoura, atingindo um tempo crítico e constituindo diferentes fases de deterioração (tempo de corrosão) que se manifestam de diferentes formas. No fundo, o tempo crítico é a soma do tempo de despassivação (inicial) com o tempo de corrosão propriamente dito. É com base nesse tempo crítico que se definem estados limites. No caso de ambientes marítimos é a duração do período de iniciação, que em geral, condiciona a vida útil das estruturas, dado que as velocidades de corrosão são muito elevadas.

Independentemente da fase a considerar, os modelos elaborados para mecanismos de deterioração abrangem várias etapas como por exemplo: determinação de equações representativas de mecanismos físicos e químicos e procedimentos analíticos ou numéricos para a sua aplicação; análise de sensibilidade para determinar parâmetros críticos; recolha de dados com base nas condições de exposição das estruturas; avaliação da precisão do modelo por comparação dos pressupostos com o comportamento real. A maior parte desses modelos têm por base a difusão como o maior mecanismo de transporte dos cloretos.

Segundo Costa e Appleton (1999), de acordo com a lei de Fick, o transporte de cloretos através de uma área unitária, de uma secção de um elemento de betão, por unidade de tempo (fluxo F) é proporcional ao gradiente de concentração de cloretos medido na direção perpendicular à secção:

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x}$$

Onde,

- D – coeficiente de difusão (m²/s)
- C – concentração de cloretos (kg/m³)
- x – distância à superfície (m)

3.3.2. LNEC E464 E LNEC E465

A especificação LNEC- Laboratório Nacional de Engenharia Civil (2001) E464 é prescritiva para uma vida útil de projeto de 50 ou 100 anos face às ações ambientais, e apresenta regras e tabelas para esse mesmo propósito. Inclui quadros que especificam os diferentes tipos de classe de exposição com descrições e exemplos para facilitar a escolha, contendo ainda condições para assegurar a aptidão do betão a utilizar em obra, através de tabelas que apresentam limites da classe de resistência e das quantidades dos componentes do betão para que este alcance uma vida útil de 50 anos. Para alcançar a vida útil de 100 anos esta metodologia expõe que para as classes de exposição XC e XS e XD, betão sobre a ação de dióxido de carbono e cloretos, o recobrimento deve de ser aumentado em 10 mm e para as classes de exposição XA e XF, ataque químico e ação gelo/degelo, a máxima razão água/cimento deve ser diminuída de 0.05, a mínima dosagem de cimento é aumentada de 20 kg/m³, e a classe de resistência à compressão simples dos betões é aumentada em 2 classes.

É relevante referir, também, que neste documento existem regras para situações em que existe combinação de classes de exposição, e as combinações mais frequentes são apresentadas de seguida:

- A classe X0 e, em geral, a classe XC1 se aplicam isoladas;
- A carbonatação é um processo comum a todas as estruturas de betão e a ação dos cloretos ou os ataques químicos e por gelo/degelo são específicos de certos ambientes;
- Na orla marítima (classes XS) o número de dias com temperaturas negativas (onde se poderiam aplicar as classes XF) é desprezível, enquanto no interior, nomeadamente nas zonas com um total de 30 ou mais dias com temperaturas negativas, pode haver combinação das classes XF2 com a XD (embora esta classe seja pouco frequente em Portugal);
- O ataque químico (XA) ao betão de fundações, obras de suporte de terras ou pavimentos em contacto com solos dá-se em solos agressivos ou em águas agressivas com nível freático atingindo as fundações e ao betão de superestruturas de reservatórios ou condutas por ação de águas agressivas.

A especificação LNEC E465 concretiza o estipulado na NP EN 206-1. Nesse documento encontram-se modelos para as ações ambientais e para os períodos de iniciação e propagação estipulados por Tutti de modo a obter a vida útil de um betão armado. Quantifica de uma maneira probabilística ou semi-probabilística, usando fatores de segurança, o desempenho durante o período de iniciação para as classes de exposição XC e XS, e apresenta exemplos para a aplicação da metodologia. Esta especifica, através de modelos matemáticos, os requisitos de desempenho do betão armado relacionados com a corrosão das armaduras.

Por sua vez esta metodologia apresenta algumas debilidades já que os modelos apresentados simplificam a modelação tanto do ambiente que conduz à deterioração do betão armado, como do próprio comportamento dos materiais.

Existem dois modelos na especificação LNEC E465 para definir as resistências à penetração de agentes agressivos e outro para a corrosão, de modo a quantificar a vida útil de uma obra de betão armado e pré-esforçado.

Segundo a especificação LNEC E465 os requisitos de durabilidade consistem simplesmente em evitar as reações que induzem a deterioração, como por exemplo:

- Mudar o ambiente com revestimentos, pinturas ou membranas;
- Escolher materiais não reativos aos agentes agressivos do ambiente;
- Utilizar proteção catódica para inibir as reações.

3.3.3. MODEL CODE 2010

Ao longo dos últimos anos, são várias as instituições que se têm dedicado ao estudo da durabilidade e criação de modelos. Uma delas é a *fib* (*federation internationale du béton*) que desenvolveu o *Model Code 2010*. Segundo Pereira (2016), este modelo quantifica e prevê o estado limite referente ao desempenho de uma estrutura em termos de fiabilidade. São quatro os passos que definem a obtenção da durabilidade de uma estrutura de betão armado. O primeiro passo será quantificar o mecanismo de deterioração com modelos reais que descrevem o processo físico ou químico de um modo fiável. O segundo passo é a definição do estado limite para o qual a estrutura deve ser dimensionada. Os estados limite geralmente definidos são a despassivação da armadura devido a penetração de cloretos, fissuração devido à corrosão do aço, destacamento do recobrimento devido à oxidação da armadura e por fim o colapso devido à perda de secção da armadura. O terceiro passo consiste no cálculo da probabilidade de atingir o estado limite definido no passo dois, expressa em termos do fator de fiabilidade. Este passo só será atingido aplicando o modelo escolhido no passo um. O quarto passo corresponde à definição do tipo de estado limite, estado limite de serviço ou último. Para a despassivação das armaduras é normal utilizar um fator de fiabilidade alvo na ordem de 1.0 a 1.5, já que a sua ocorrência não põe a estrutura em perigo imediato, ou seja, trata-se de um estado limite de serviço.

A vida útil pode ser obtida a partir deste documento através de três métodos diferentes, utilizando o recobrimento das armaduras como única barreira à ação ambiental. O método probabilístico deve ser utilizado apenas em pontes e outras estruturas excepcionais. O método do fator de segurança parcial é um método determinístico em que a natureza probabilística do problema é tida em conta através de um fator de segurança parcial, de forma semelhante ao cálculo estrutural. Finalmente, existe ainda a metodologia prescritiva, que ao contrário dos métodos existentes baseados na experiência, é baseada em métodos probabilísticos com modelos físicos e químicos adequados.

O *fib Model Code* apresenta a modelação de vários mecanismos de deterioração como:

- a corrosão induzida pela carbonatação;
- a corrosão induzida pela penetração de cloretos;
- a ação gelo/degelo possuindo agentes anti-congelantes;
- a ação gelo/degelo sem possuir agentes anti-congelantes;

3.4. TIPOS DE ESTRUTURAS MARÍTIMAS EM BETÃO

O projeto e a execução de obras costeiras, marítimas e portuárias apresentam grande complexidade, por exigirem a utilização conjunta de saberes técnicos e científicos oriundos de diferentes áreas do conhecimento, de entre as quais podem destacar-se a engenharia civil, a engenharia naval, a engenharia do ambiente, a física, a geologia, a matemática, a meteorologia, a hidráulica marítima e a oceanografia física.

As estruturas marítimas têm vários propósitos, sendo muitas vezes aplicadas como medida de defesa contra a erosão e a inundação da costa. Estas estruturas, ao impedirem a livre ação das ondas do mar e condicionarem a circulação de sedimentos, protegem praias, costas, bacias e portos e proporcionam a estabilização dos canais de navegação.

As estruturas marítimas em betão podem ser de vários tipos como por exemplo estruturas portuárias abrigadas ou expostas, pontes cais, estruturas de defesa costeira, edifícios de apoio portuário, entre outras, tal como se mostram nas Figuras 3.5 a 3.9.

Tipos de Estruturas Marítimas em Betão

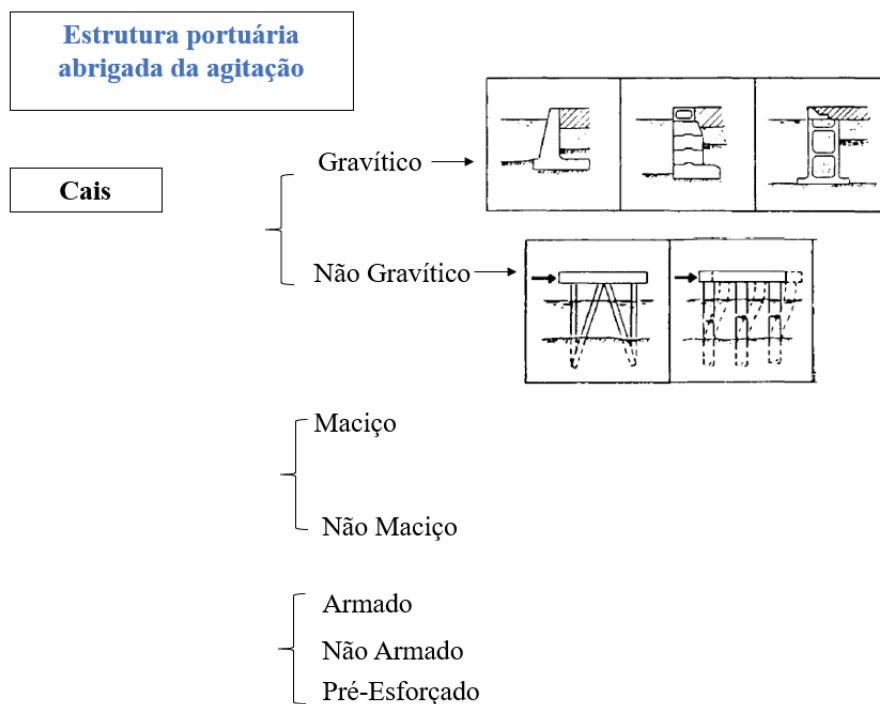


Figura 3.5 - Esquema representativo de estruturas do tipo cais (adaptado de Mehta, 1991)

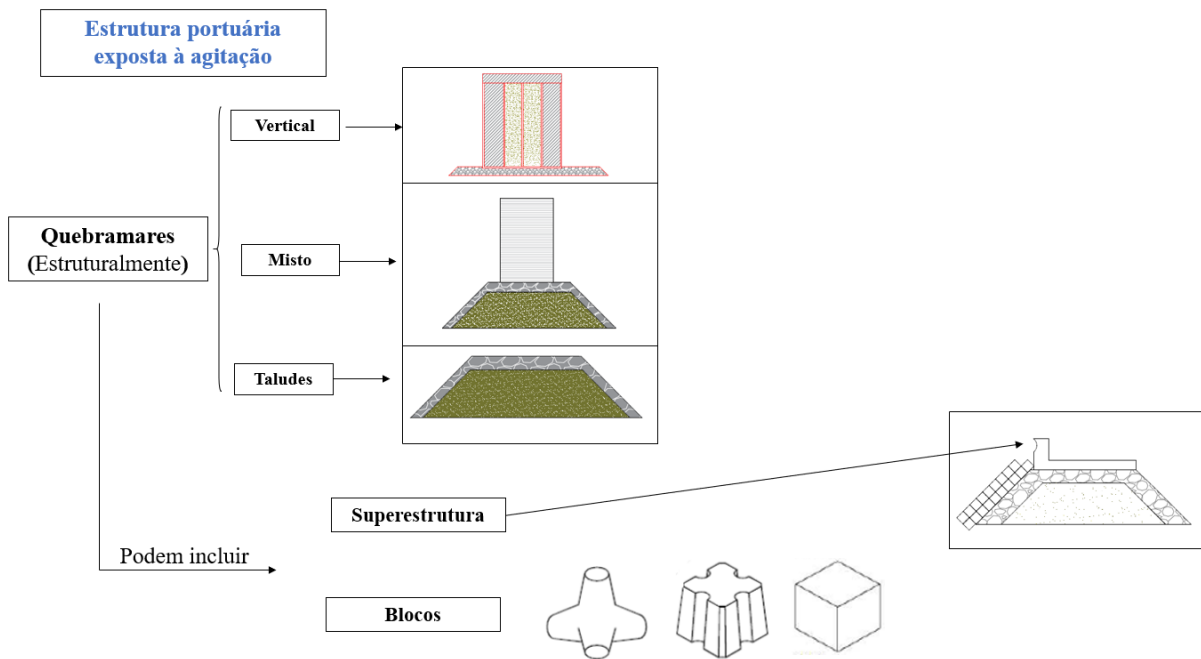


Figura 3.6 - Esquema representativo de estruturas expostas à agitação marítima (fonte própria)

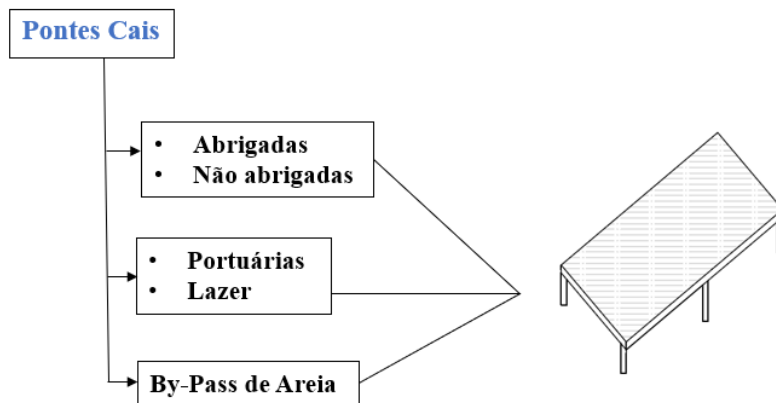


Figura 3.7 - Esquema representativo de estruturas do tipo pontes cais (fonte própria)

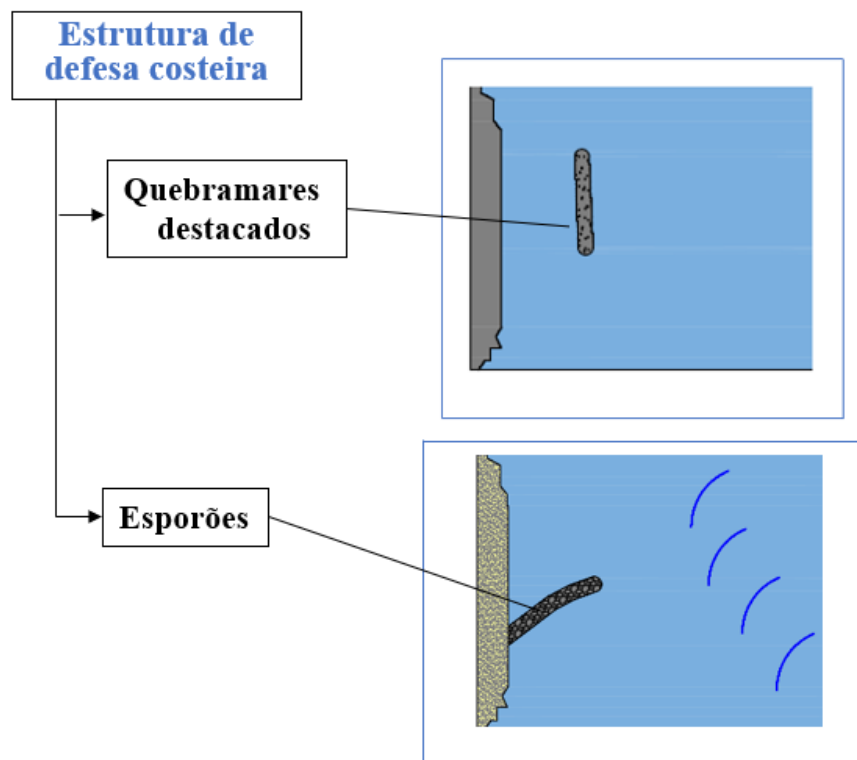


Figura 3.8 - Esquema representativo de estruturas de defesa costeira (fonte própria)

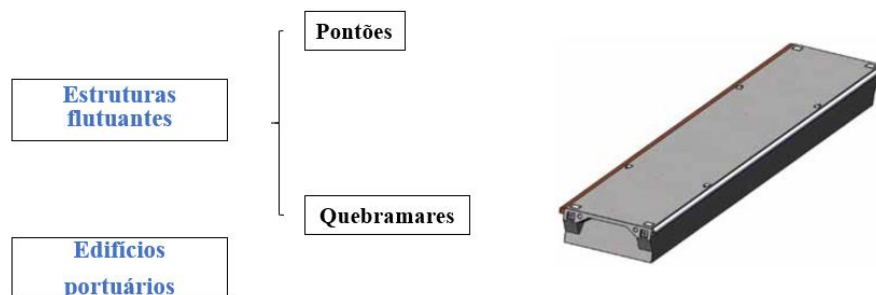


Figura 3.9 - Esquema representativo de outros tipos de estruturas (adaptado de Lindley, 2019)

3.4.1. CAIS

Os cais são estruturas robustas para a acostagem e amarração de navios. Poderão ser abrigadas, ou não, por outras estruturas como quebramares e devem resistir a forças de reação originadas pelos navios, que poderão ser de maior ou menor intensidade, consoante a embarcação. Existem vários tipos de cais que poderão receber passageiros ou cargas a granel sólido, líquido, contentores, cargas rolantes. O tipo de

estrutura a adotar irá depender também da profundidade das águas e, em caso de baixas profundidades é usual verem-se estruturas do tipo gravítico como se mostra na Figura 3.10, em que o peso de blocos construídos a partir de betão é a componente estabilizadora, ou caixões de betão (no caso de fundo aberto são designadas aduelas) que serão enchidos com o mesmo material ou areia. No caso de águas mais profundas, mas não superiores a 50 m, é mais comum a utilização de estacas como na Figura 3.11 ou plataformas suspensas.

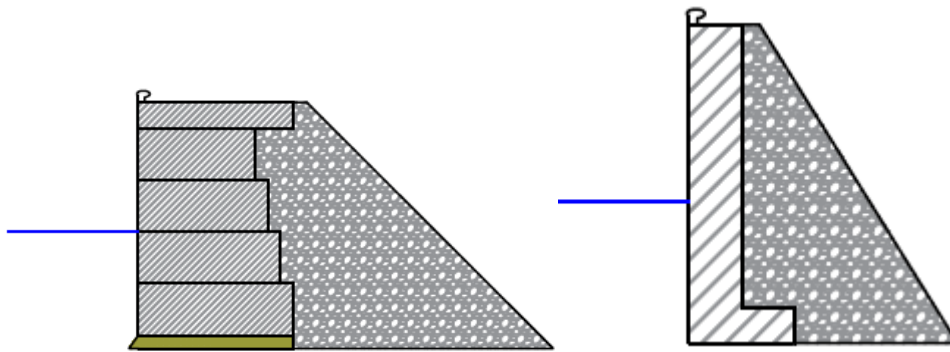


Figura 3.10 - Esquema de cais em blocos de betão do estilo gravítico (fonte própria)

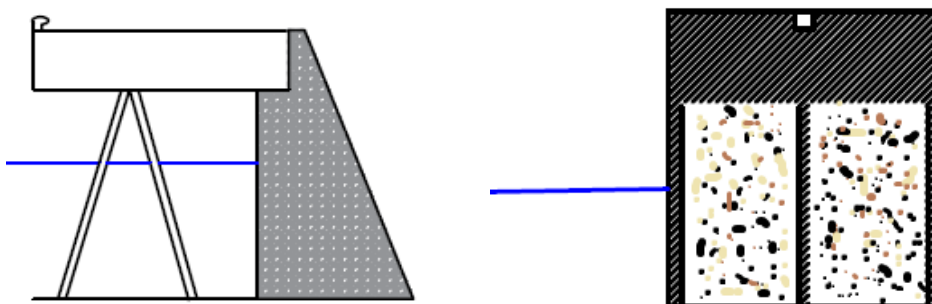


Figura 3.11 - Esquema de cais fundado em estacas (esq.) e do tipo caixão (dta.) (fonte própria)



Figura 3.12 - Construção de caixão para doca no porto de Cape Town (Mark Alexander, 2018)

O terminal multiusos do porto de Leixões, representado em fase de construção na Figura 3.13, é um exemplo de cais formado em blocos. Este terminal destina-se a serviços do tipo RO-RO. Contém um terrapleno de cerca de 8 hectares e foram utilizados cerca de 42500 m³ de betão e cerca de 1546 blocos do tipo NOREF (31 a 67 toneladas). Um estudo de Veloso Gomes *et al* (2007) verifica que estes blocos permitem a constituição de um paramento acostável aberto (menos refletor) que procura melhorar, ou pelo menos não agravar, as condições de agitação numa bacia portuária, especialmente na vizinhança do cais, e reduzir os níveis de galgamento. Estes blocos constituem um cais com descontinuidades (cavidades) que aumentam a dissipação de energia incidente e tornam o cais menos refletor, facilitando as manobras de acostagem bem como as operações a realizar nele.



Figura 3.13 - Terrapleno do terminal multiusos de Leixões (Irmãos Cavaco)



Figura 3.14 - Cais do porto de pesca da Afurada construído em blocos NOREF (Veloso Gomes)

Os cais de estacas, como o nome sugere, é composto por estacas que são cravadas no solo de fundação. É uma solução leve e apta para solos não muito duros. Poderão ser providas de um prisma de alívio ou não. A cravação das estacas poderá ser um processo complexo, daí ser mais aconselhada para solos mais trabalháveis uma vez que implica abertura de vala, fixação da estaca e enchimento com betão.



Figura 3.15 - Cais fundado em estacas com viga de coroamento em betão armado (Veloso Gomes)

Os cais formados por caixotões de betão armado são outra solução possível. Estruturalmente são unidades fechadas constituídas por paredes verticais com base numa laje de fundo que tem o objetivo de assegurar uma distribuição mais uniforme das cargas e não concentradas numa só zona, e por vezes com uma superfície dentada para garantir uma melhor aderência ao prisma de fundação, aumentando o atrito entre o enrocamento e o betão da laje de fundo. Em planta chegam a apresentar dimensões de 50 por 25 metros e em altura até 30 metros, como os do Porto de Gijon. Os caixotões retangulares são os mais comuns, mas também existem em secção circular. Dado a grande dimensão das paredes surge a necessidade da existência de paredes interiores que assegurem o travamento entre estas paredes exteriores. Estas paredes interiores originam células que mais tarde serão enchidas com areia, enrocamento de pequenas dimensões, betão, ou uma combinação entre estes. Os caixotões são solidarizados com uma superestrutura (viga em betão armado) no coroamento e podem ser projetados para flutuarem e serem colocados por afundamento controlado através do enchimento com areia ou enrocamento de pequenas dimensões, ou em unidades mais pequenas para serem elevados e posicionados com grua, como se mostra na Figura 3.16. O projetista deste tipo de estruturas além das condições locais, e condições de fabrico, deve ter também em consideração o equipamento à disposição das empresas de construção locais. O caixotão projetado para flutuar é, em geral, muito maior que o caixotão que é elevado por grua, onde o peso do caixotão tem de ser limitado à capacidade de elevação da grua.



Figura 3.16 - Estrutura flutuante para fabrico de caixotões (Etermar)

3.4.2. QUEBRAMARES

Os quebramares são estruturas construídos para reduzir a ação das ondas constituindo um plano de água abrigado. As ondas ao embater na estrutura do quebramar refletem e dissipam a energia. Para efeitos de proteção costeira poderão ser construídos junto à costa, normalmente com orientação paralela à linha costeira, designando-se por quebramares destacados. Poderão também ser construídos nos portos para criar um ambiente de águas calmas que facilitam as operações de manobra, acostagem e operacionalidade dos navios. Genericamente, os quebramares podem ser classificados como verticais, mistos ou de taludes no que diz respeito à orientação das suas “paredes”, como se mostra na Figura 3.17.

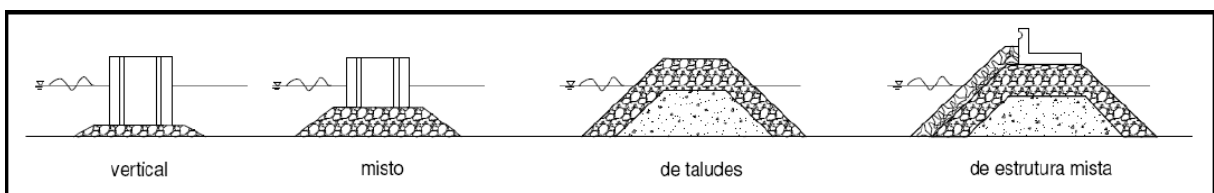


Figura 3.17 - Representação dos vários tipos de conceção de quebramares (Hugo Lopes, FEUP)

Por vezes os quebramares podem ser concebidos para proteger outros quebramares mais próximos da linha de costa, ou até para promover a deposição de areias. Se o quebramar tiver uma cota de coroamento mais baixa que a mais baixa baixa-mar previsível, designa-se por quebramar submerso.

Tal como mostra a Figura 3.17, os quebramares verticais são estruturas que apresentam paramento de orientação vertical, impermeáveis, refletindo a energia das ondas para o largo sem sofrer rebentação. Estes são geralmente mais robustos, de forma a suportarem o impacto da agitação incidente sem qualquer dissipação, e são constituídos essencialmente por blocos de betão, caixotões de betão, blocos de pedra, estruturas de betão e estacas prancha metálicas.

Os quebramares de talude são caracterizados geometricamente por um perfil tipo transversal trapezoidal, como se mostra na Figura 3.18, sendo grande parte da energia das ondas dissipada no talude através de uma emulsão ar-água e a restante refletida para o largo. O manto resistente é a faixa externa do talude anterior, sobre a qual se dá o embate direto da agitação sendo constituído por blocos (naturais ou artificiais), em geral colocados em duas camadas ou fiadas, não atingindo necessariamente o pé do talude. Tem como principal função a dissipação de energia, protegendo também as camadas subjacentes da erosão provocada pela agitação.

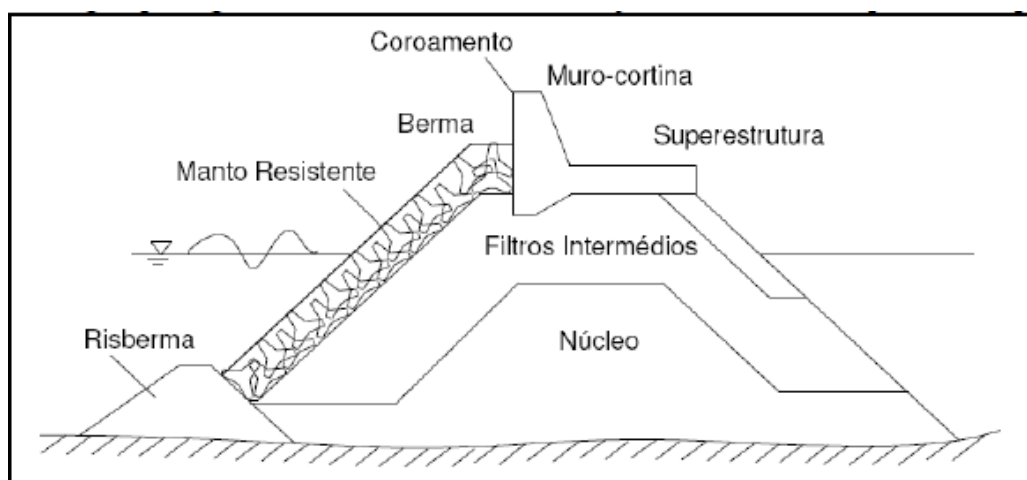


Figura 3.18 - Perfil transversal de um quebramar de talude (Hugo Lopes, FEUP)

No caso de quebramares mistos, estes funcionam como quebramares de talude até um certo nível de agitação, e acima funcionam como quebramares verticais. Poderão ser considerados de estrutura mista, se possuírem uma superestrutura, regra geral em betão, denominado muro cortina que funciona como um defletor das ondas incidentes.

O manto resistente da maioria dos quebramares é constituído de enrocamento ou blocos de betão simples pré-fabricados, cujas dimensões e peso são as incógnitas a determinar na fase de projeto. A forma que estes assumem também irá condicionar o comportamento do quebramar e dependem essencialmente do comportamento hidráulico e estrutural destes. Os diversos tipos de blocos de betão mais utilizados encontram-se representados na Figura 3.19 e os blocos do tipo tetrápodes na Figura 3.20.

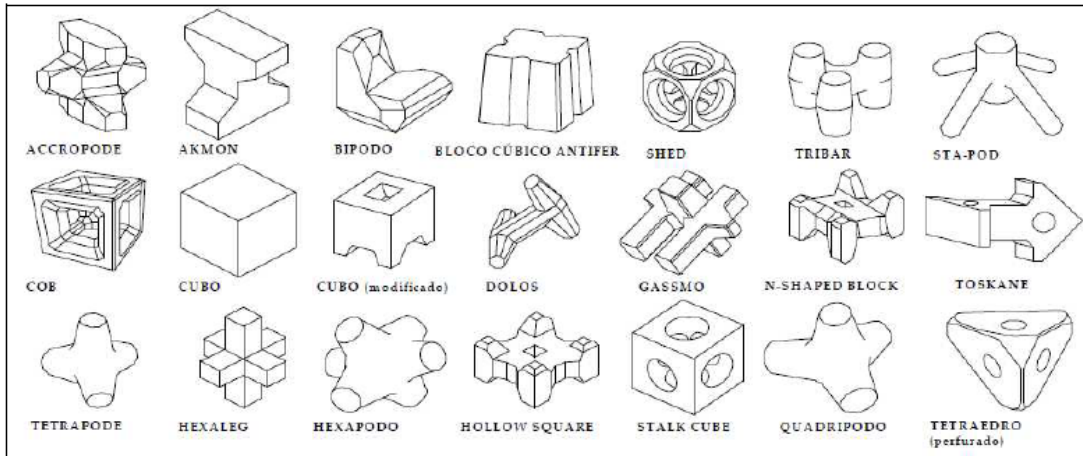


Figura 3.19 - Modelos de blocos de betão que constituem o manto resistente (Apontamentos de Trabalhos Marítimos 1, FEUP)



Figura 3.20 - Quebramar de taludes constituído por blocos tetrápodes em betão, TPL de Leixões (APDL)

Os quebramares flutuantes (Figura 3.21) são estruturas igualmente utilizadas para a dissipação da energia das ondas, possuindo características que proporcionam resultados satisfatórios quando implantadas em zonas sujeitas a ondas com energia relativamente baixa. Os quebramares flutuantes são usualmente constituídos por elementos celulares em betão, sendo posicionados em zonas destinadas à proteção de marinas, como as docas flutuantes.

Os quebramares destacados, como o da Figura 3.22, são elementos singulares ou múltiplos que funcionam como elemento de defesa costeira, geralmente posicionados paralelamente à costa e a uma certa distância desta. Neste tipo de estruturas marítimas pode não prevalecer a função de abrigo portuário, mas sim a função de reduzir a erosão provocada pelas ondas sobre a costa, intercetando primordialmente as ondas incidentes.

Cada quebramar influencia na defesa da costa, visto que tem a função de dissipar a energia das ondas, reduzindo-a. A soma do trabalho individual prestado por cada elemento, no global, pode reduzir de forma significativa a erosão da praia. Os sedimentos existentes nos fundos envolventes e na praia depositam-se no tardo dos quebramares destacados, assentando numa zona em que a energia das ondas é menor.

Os quebramares destacados são geralmente constituídos por enrocamentos, embora possa ser opção o emprego de blocos ou caixotões de betão, bem como estacas metálicas ou em madeira, no caso de zonas mais abrigadas.

Estas estruturas são, por vezes, imersas na sua totalidade, o que faz com que contribuam para o rebentamento precoce das ondas, além de permitirem que os sedimentos possam galgá-las mais facilmente. Ao serem submersos, desde logo constituem um fator de risco, tanto para os banhistas como para as embarcações.

Tal como acima referido, os quebramares destacados são úteis para a redução da erosão das costas marítimas, além de serem eficazes na proteção de praias artificiais. Têm como desvantagem o facto de, em caso de deposição em excesso de sedimentos, criarem barreiras à livre circulação e renovação da água, podendo assim contribuir para o aumento da poluição junto à costa. Por questões económicas, estes quebramares não são aconselhados para zonas de muita profundidade.



Figura 3.21 - Exemplo de quebramar flutuante de paramento vertical construído em betão (Nuno Sousa, 2011)



Figura 3.22 - Quebramar destacado da Aguda construído em betão ciclópico (Irmãos Cavaco)

3.4.3. DIQUES

Os diques são estruturas que têm como função proteger as zonas de cotas mais baixas das inundações, como se exemplifica na Figura 3.23. Os diques são assentes sobre a terra e apresentam um núcleo que pode ser de asfalto, betão, rocha ou até forte vegetação. A altura que assumem é função da agitação marítima que atinge a costa.



Figura 3.23 - Representação de um dique com blocos de betão (Hillblock)

3.4.4. ESTRUTURAS ADERENTES

Os paredões são estruturas aderentes implantadas em zonas terrestres, geralmente paralelas à linha de costa e com paredes de face pouco inclinada ou mesmo vertical, construídas em betão armado ou betão ciclópico, que têm como principal função a defesa costeira, impedindo o galgamento do mar.

Também existem paredes verticais que são muros de contenção, geralmente construídos ao longo da costa marítima que previnem da erosão e deslizamento de terras causados pela agitação marítima e que, poderão também evitar inundações apesar de não ser o principal propósito da sua construção, como se mostra na Figura 3.24.

Os revestimentos, como os da Figura 3.25, são estruturas semelhantes aos diques que têm como função proteger a costa dos fenómenos de erosão. São tipicamente revestimentos de betão, pedra ou asfalto apresentando uma inclinação em relação ao mar.



Figura 3.24 – Exemplo de um paredão, *seawall* (Seawall Doctors)



Figura 3.25 - Exemplo de revestimento costeiro em blocos de betão (External Works)

3.4.5. ESPORÕES

Os esporões (*groins*) são estruturas projetadas geralmente perpendicularmente à costa, de forma quase sempre retilínea, como se apresenta na Figura 3.26, podendo também haver configurações em T ou L. A principal função destes elementos é proteger da erosão costeira através do depósito de sedimentos. Muitas vezes os esporões surgem em grupo ou combinados com outras estruturas de proteção costeira, com o propósito de obter uma melhor eficiência que pode ser avaliada de acordo com a quantidade de sedimentos que ficam retidos a barlar desta estrutura. Os esporões podem ser permeáveis, ou seja, passíveis de serem atravessados pela água e sedimentos, ou impermeáveis. De igual modo, podem ser emersos ou submersos. Para o dimensionamento destas estruturas é necessário definir o comprimento, altura e permeabilidade a adotar que são fatores dependentes das condições marítimas a que estarão sujeitos. As ondas têm um papel primordial no transporte dos sedimentos e, no caso destas apresentarem uma declividade considerável, farão com que existam mais sedimentos em suspensão, enquanto que as ondas de menor declividade irão contribuir para um transporte de sedimentos essencialmente por arrastamento. Os esporões, na sua grande maioria, são construídos com rochas empilhadas de forma regular umas sobre as outras, blocos de betão, como se mostra na Figura 3.27, ou num sistema de gabiões, devendo ser capazes de suportar as cargas provocadas pelas ondas.

Porém, podem também ser construídos em madeira, com sacos de alta resistência enchidos com argamassa ou com estacas-prancha preenchidas por betão ou agregados. Devido aos impactes negativos que provocam a sotamar, bem como por razões estéticas, a sua construção é cada vez mais polémica, sendo preferível, com frequência, adotar outras formas de proteção ambientalmente menos agressivas, como as alimentações artificiais.

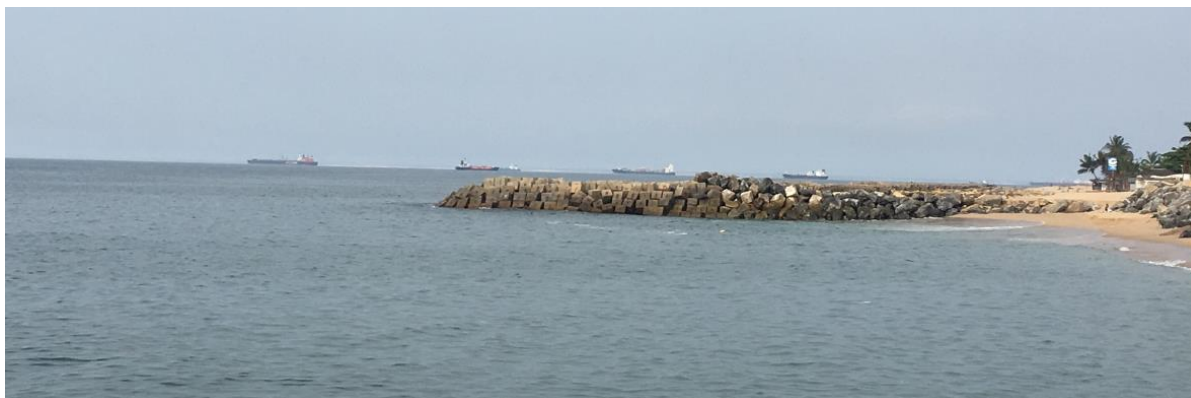


Figura 3.26 – Imagem representativa de um esporão em Luanda do campo de esporões da Ilha de Luanda, Angola (fonte própria)



Figura 3.27 – Blocos cúbicos de 1 m³, constituintes do esporão da imagem anterior em Luanda, Angola (fonte própria)

3.4.6. MOLHES

Os molhes (*jetties*) são estruturas longas e estreitas dimensionadas com diversos objetivos nomeadamente:

- estabilizar canais de navegação junto a foz dos rios e embocaduras;
- criar locais adequados de acostagem que facilitem as manobras das embarcações;
- criar zonas de abrigos contra ondas de tempestade;
- proporcionar abrigo contra as correntes marítimas desfavoráveis na zona onde estão implantadas;

Este tipo de obra tem características semelhantes a um pontão, estendendo-se em direção ao mar e são constituídos por blocos de betão ou rochas, ou até caixotões, conforme se apresenta na Figura 3.28.



Figura 3.28 - Molhes do Douro construídos por caixotões celulares em betão armado (Jornal de Notícias)



Figura 3.29 - Molhe norte de Aveiro construído em blocos de betão maciços do tipo *antifer* (Irmãos Cavaco)

3.4.7. PONTÕES E PONTES CAIS

As pontes cais (*piers*), representadas nas Figuras 3.31 e 3.32, são estruturas que funcionam como uma ponte, ou seja, uma laje assente em pilares/estacas. Estas estruturas são geralmente construídas em betão armado e podem ter finalidade portuária, como por exemplo para acostagem de barcos de pesca ou de recreio, ou passadiços pedonais que se estendem em direção ao mar. Os pontões são estruturas flutuantes que permitem a acostagem e amarração de embarcações. Ambas as estruturas têm características semelhantes e muitas vezes aparecem combinadas como se representa na Figura 3.30.



Figura 3.30 - Esquema de pontões flutuantes em betão (Lindley)



Figura 3.31 - Ponte cais em betão (*piér*) situada em Cabo Verde (Somague)



Figura 3.32 – Ponte cais (*pier*) construída em betão (Infracorr)

3.4.8. ESTRUTURAS *BYPASS* DE AREIA

O sistema *bypass* (transposição) de areia consiste no princípio de bombagem, transporte e depósito de areia de forma a manter a morfologia costeira de certas zonas evitando então fenómenos de erosão ou depósito de sedimentos. De acordo com Pinheiro (2008), estes problemas ocorrem com mais frequência em zonas de embocaduras de rios devido à interação de diversos agentes, pelo que condicionam os canais de navegação. Cada um destes projetos é singular pois depende das condições locais como agitação marítimas, tempestades, vento, recorte costeiro, etc. Muitas vezes estes sistemas revelam-se insuficientes devido à falta de sedimentos para depositar ou também porque a mistura água-areia revela-se agressiva para os equipamentos de bombagem. Loza (2008) afirma que muitas vezes aparecem estruturas do tipo pontões, construídos em betão que incorporam *pipelines* de apoio a estes sistemas de bombagem tal como se exemplifica na Figura 3.33.



Figura 3.33 - Sistema *bypass* com bombas assentes nos pilares de uma estrutura de betão na Austrália (www.insidegoldcoast.com)

3.4.9. EDIFÍCIOS

Naturalmente que em ambiente marítimo também se inserem alguns edifícios, não só de vertente habitacional, como também de apoio portuário (escritórios, armazéns) muitos deles construídos em betão, sujeitos a vários tipos de agressividades. Podem ser destacados armazéns de apoio a portos de pesca, armazéns de apoio a depósito de produtos a granel, oficinas de apoio a equipamentos industriais, edifícios de apoio a marinas, edifícios de apoio a terminais de cruzeiro como é o caso do emblemático terminal de cruzeiros do porto de Leixões, construído em betão mas revestido com azulejos, edifícios alfandegários e de policiamento marítimo, etc.



Figura 3.34 - Lota da Póvoa de Varzim (Docapesca)

4

PREVENÇÃO DE DANOS E REPARAÇÕES DE ESTRUTURAS DE BETÃO EM AMBIENTE MARÍTIMO

4.1. ENQUADRAMENTO DO CAPÍTULO

Este capítulo tem como principais objetivos descrever algumas técnicas de reparação em estruturas de betão, armado ou não, inseridas em meios marítimos. Apesar deste trabalho incidir essencialmente sobre o material betão, torna-se difícil separar o elemento aço neste capítulo 4, uma vez que a maior parte das estruturas são de betão armado. Um outro tópico a ser referido baseia-se nas boas práticas de construção em ambientes marítimos como por exemplo betonagens submersas ou processos de cura nestes ambientes uma vez que a prevenção de anomalias é a melhor das soluções.

4.2. GENERALIDADES

De acordo com o que já foi apresentado no capítulo 2 são várias as causas que levam à deterioração do betão e do aço, o que conduz a um comportamento estrutural desadequado e a que as estruturas não cumpram o período de vida útil para o qual foram projetadas, provocando deformações elevadas ou fendilhação excessiva na peça.

A reparação de uma estrutura de betão armado pode ser dividida em três fases: avaliação do estado da estrutura, definição da metodologia de intervenção e execução da reparação.

Na fase da avaliação deve-se reconhecer o tipo, causas e nível da deterioração e avaliar o nível de segurança da estrutura. Este procedimento desenvolve-se com recolha de informação ao nível do projeto, execução, manutenção. Todos estes elementos referidos são de grande importância porque as causas das anomalias muitas das vezes estão associadas a uma má execução podendo até decorrer de um projeto deficiente ou com falhas. Segue-se, uma inspeção visual que deve ser cuidada e minuciosa com o objetivo de caracterizar todas as anomalias presentes, identificar as suas causas e avaliar o estado de conservação global da estrutura e dos seus componentes. De modo, a obter informação mais detalhada segue uma avaliação com base em ensaios que podem ser de caráter não destrutivo ou parcialmente destrutivo. Estes ensaios irão revelar índices que permitem avaliar o nível de deterioração e segurança da estrutura.

A definição da metodologia de intervenção é função do tipo de deterioração, do nível de deterioração, da utilização da estrutura, da manutenção associada à técnica de intervenção e dos custos. Ao nível da metodologia poderá mesmo ser necessário uma avaliação detalhada da capacidade de carga, reduzindo

as cargas atuantes posteriormente. Outras opções poderão passar pela substituição de alguns elementos estruturais ou até pela demolição. A reparação e prevenção é e deve ser sempre uma solução viável principalmente se forem estruturas marítimas de grande porte como por exemplo cais de acostagem.

4.3. NORMA EN 1504

De modo a regulamentar a reparação e proteção de estruturas de betão armado surge a Norma Europeia EN 1504 (2006) que define: alguns princípios de reparação; a necessidade de diagnósticos precisos das causas de deterioração antes das reparações; requisitos de desempenho dos produtos e métodos de ensaios; o controlo de produção na fábrica e avaliação da conformidade, incluindo marcação CE; métodos de aplicação e controlo de qualidade dos trabalhos.

Resumidamente, a Norma NP EN 1504 divide-se em dez partes.

- Parte 1: Definições – EN 1504-1

Nesta parte da norma classificam-se e definem-se os tipos de produtos e sistemas para reparação, manutenção, proteção ou reforço de estruturas de betão. As definições aqui presentes estão agrupadas em três grupos diferentes como definições gerais dos produtos, sistemas e tecnologias usadas; definições das principais categorias de produtos e sistemas para proteção superficial, reparação estrutural e não-estrutural, colagens estruturais, injeções, ancoragens, proteção das armaduras; definições dos principais tipos de químicos e constituintes de produtos e sistemas para proteção e reparação como por exemplo líquidos hidrófobos, adjuvantes, argamassas com polímeros, etc.

- Parte 2: Sistemas de proteção superficial do betão –EN 1504-2

Nesta parte são especificados os requisitos para a identificação, comportamento e segurança de produtos e sistemas para proteção superficial do betão, de modo a aumentar a durabilidade de estruturas de betão. As medidas de proteção superficial podem ser de tratamento da superfície (através da impregnação de produtos hidrófobos ou preenchimento de poros) ou de pintura.

- Parte 3: Reparações estruturais e não-estruturais – EN 1504-3

A parte três da norma especifica os requisitos de comportamento e segurança dos produtos e sistemas para reparação estrutural e não estrutural. Apresentam-se indicações dos sistemas de reparação que podem ser caldas, argamassas e betões combinados com outras componentes como colas.

- Parte 4: Aderência estrutural – EN 1504-4

A parte quatro, especifica os requisitos de identificação e desempenho nos produtos e sistemas a utilizar na colagem de materiais de reforço estrutural. Aplica-se na colagem de aço-betão, FRP-betão e aderência betão-betão.

- Parte 5: Injeção – EN 1504-5

Esta parte inclui as conformidades para produtos de preenchimento de fendas e cavidades internas no betão, por injeção ou por gravidade, em trabalhos de proteção ou reforço de estruturas. Com este método pretende-se garantir a estanquidade da estrutura e evitar a penetração de agentes agressivos que induzam corrosão nas armaduras.

- Parte 6: Injeção de caldas em ancoragens – EN 1504-6

Nesta parte são especificados os requisitos para a utilização de produtos de injeção de caldas em ancoragens, em trabalhos de proteção ou reforço de estruturas.

- Parte 7: Prevenção da corrosão – EN 1504-7

A parte sete define os tipos de revestimentos para a proteção das armaduras de aço em estruturas de betão armado, excluindo as armaduras de pré-esforço e aço inox. São incluídos também os produtos de prevenção da corrosão das armaduras, em particular por realcalinização e extração eletroquímica de cloretos.

- Parte 8: Verificação da conformidade – EN 1504-8

Neste subcapítulo são especificados os procedimentos para a amostragem, verificação da conformidade, marcação de produtos e identificação de sistemas para a proteção e reparação de estruturas. A verificação de conformidade baseia-se num conjunto de ensaios iniciais para demonstrar que o produto satisfaz os requisitos da parte da EN 1504 que se lhe aplica.

- Parte 9: Princípios gerais para o uso – EN 1504-9

A parte 9 é a parte principal para a aplicação dos produtos e sistemas de reparação. Serve como uma orientação com vista a solucionar, reparar ou corrigir algum dano ou anomalia presente nas estruturas.

Esta pré-norma identifica as etapas principais de um processo de reparação como por exemplo: avaliação das condições da estrutura, causas da deterioração, objetivos da proteção e reparação, seleção dos princípios e métodos adequados para a proteção e reparação, definição das propriedades dos produtos e sistemas, especificação dos requisitos de manutenção após os trabalhos de proteção e reparação.

Nesta parte 9 são ainda incluídas considerações sobre a necessidade de ensaios antes, durante e após os trabalhos de reparação; considerações sobre a reparação de defeitos por causas mecânicas, assentamentos diferenciais, carregamento excessivo, ataques biológicos, construção deficiente; considerações sobre a obtenção da capacidade estrutural resistente por substituição e colocação de betão.

A avaliação das causas e consequências de defeitos em estruturas de betão, deve incluir o levantamento das condições presentes, as hipóteses do projeto original, caracterização da exposição ambiental, condições de utilização. Posto isto, a decisão da estratégia mais adequada para atingir os requisitos de durabilidade de uma estrutura a reparar recai sobre: não atuar durante um intervalo de tempo, reanalisar a capacidade estrutura e eventualmente reduzir os níveis de carga; prevenção ou redução da futura deterioração, sem alteração direta na estrutura e reparação, reforço, reconstrução ou demolição de parte ou toda a estrutura.

- Parte 10: Aplicação e controlo de qualidade

Esta última parte apresenta os requisitos para o armazenamento, preparação e aplicação de produtos de proteção e reparação de estruturas. Visa essencialmente as condições físicas e químicas das bases de aplicação de quaisquer produtos de reparação, incluindo a pesquisa de contaminantes. Deve ser avaliada a capacidade da estrutura para suportar cargas, movimentos ou vibrações durante a execução dos trabalhos, bem como a compatibilidade dos materiais estruturais com os materiais de reparação.

Ainda no seguimento da norma europeia EN 1504, em particular a parte 9 que enumera alguns princípios de reparação e os respetivos métodos apresenta-se o quadro 4.1 que tem como objetivo resumir a informação transmitida pela norma.

P1 – proteção contra penetração dos agentes agressivos

P2 – controlo da humidade

P3 – reperfilamento do betão

P4 – reforço estrutural

P5 – resistência física

P6 – resistência química

P7 – manutenção ou restauro da passividade

P8 – aumento da resistividade

P9 – controlo catódico

P10 – proteção catódica

P11 – controlo de zonas anódicas

Métodos	Princípios de Reparação e Proteção de Betão Armado										
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
Impregnação Hidrofóbica	X	X						X			
Revestimento	X	X			X	X		X			
Preenchimento de Fissuras	X			X							
Aplicação de Membranas	X										
Reperfilamento de Betão			X								
Aumento do Recobrimento							X				
Subst. do Betão Contaminado							X				
Re-alkalinização Elect. do Betão Carbonatado							X				
Extração Elect. de Cloretos							X				
Revestimento de Proteção de Armaduras											X

Quadro 4.1 - Métodos e princípios de reparação de estruturas de betão armado (NP EN 1504)

4.4. REPARAÇÕES DE ESTRUTURAS DE BETÃO EM AMBIENTE MARÍTIMO

Tal como já foi referido anteriormente, as principais causas de anomalias de estruturas marítimas em betão são de natureza abrasiva, ciclos de gelo/degelo e penetração de elementos indesejáveis. Estes ataques resultam em perdas de secção, delaminação, abertura de fendas, entre outros danos que favorecem a penetração do dióxido de carbono e cloretos.

A Figura 4.1 esquematiza um elemento de betão cuja superfície apresenta sinais de abrasão e fendas abertas em que para reparar uma situação deste tipo recorre-se ao preenchimento da fenda, um reperfilamento e correção da superfície de betão e, posteriormente, uma impregnação hidrofóbica que torna a superfície repelente à água.

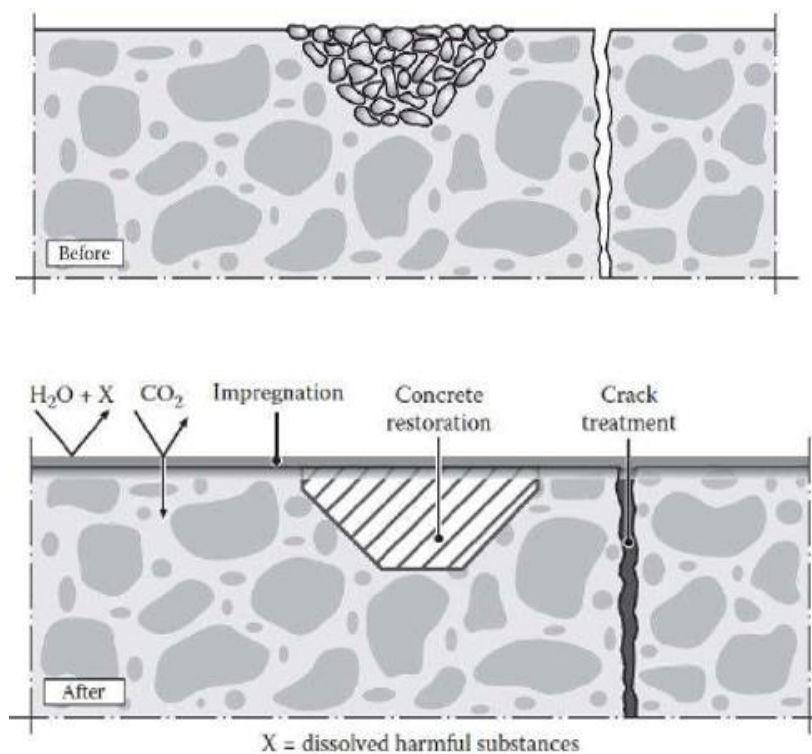


Figura 4.1 - Exemplificação de danos e possível reparação num elemento de betão (Raupach e Buttner 2014)

De seguida, apresentam-se os métodos mais comuns para a reparação de estruturas de betão em ambiente marítimo.

4.4.1. IMPREGNAÇÃO HIDROFÓBICA

Segundo Azevedo (2016), a impregnação é um método que consiste na redução da porosidade do betão, evitando assim a penetração de elementos indesejáveis. Os poros do betão devem ficar revestidos de maneira a formar uma camada de proteção homogénea da superfície. Se se tratar de uma impregnação hidrofóbica, a superfície será repelente à água, ou seja, a penetração de partículas de água é impossibilitada. A aplicação deste método de reparação deve obedecer às instruções da parte dois da EN 1504.

4.4.2. REVESTIMENTOS

À semelhança da impregnação este método também cria uma película de revestimento para melhoramento da superfície de betão, como se mostra na Figura 4.2, fazendo com que este obtenha uma maior capacidade resistente a ataques externos. Estes revestimentos são essencialmente constituídos por resinas acrílicas estando os seus requisitos expostos na parte dois da NP 1504.



Figura 4.2 - Revestimento de betão arquitetónico (Secil)

4.4.3. PREENCHIMENTO DE FISSURAS

Este método precede uma análise do tipo de fissuras expostas que podem ser do tipo estáticas ou passivas que apresentam uma largura constante e estável, ou então, do tipo fissuras ativas em que a largura vai variando ao longo do tempo. Em ambos os tipos, é requerida a selagem do elemento para não permitir a passagem de agentes agressivos exteriores.

4.4.4. APLICAÇÃO DE MEMBRANAS

As membranas constituem uma barreira (película) aos ataques e penetração dos agentes agressivos. Podem ser aplicadas sob forma líquida ou tela (rolo), sendo estas últimas tipicamente telas asfálticas muito usadas em coberturas, tal como é apresentado na Figura 4.3. Este método distingue-se dos anteriormente apresentados pelo facto de apresentarem maior elasticidade e ductilidade apesar de ser requerida uma boa aderência. Estas membranas podem ainda ser reforçadas com malhas de fibra de forma a aumentar a sua resistência mecânica.



Figura 4.3 - Aplicação de tela asfáltica em cobertura de moradia (onossopalacio.blogspot.com)

4.4.5. REPERFILAMENTO COM BETÃO: MANUAL OU PROJETADO

A técnica de reperfilamento de estruturas de betão é um método tradicional de aperfeiçoamento de elementos de betão com recurso à colher. Existem técnicas mais evoluídas como a aplicação de betão projetado que exige a utilização de equipamentos mecânicos e é muito utilizado no caso de reperfilamento de grandes áreas, como se mostra na Figura 4.4.



Figura 4.4 - Aplicação de betão projetado nas docas da Lisnave (Apeb)

4.4.6. AUMENTO DO RECOBRIMENTO COM BETÃO

Este método de restauro tem como objetivo dificultar a penetração de agentes exteriores agressivos ao betão. Tal como já foi verificado no capítulo 2, uma maior camada de recobrimento faz com que os cloretos e o dióxido de carbono tenham que percorrer uma maior camada até atingir a armadura. Este aumento de recobrimento é então proporcional à profundidade.

4.4.7. SUBSTITUIÇÃO DO BETÃO CONTAMINADO

A substituição de betão contaminado consiste na remoção do betão afetado com recurso a materiais especializados como serras com disco diamantado ou máquinas de injeção de água sob pressão. Quando se atingir uma camada de betão saudável executam-se os restantes procedimentos de reperfilamento e proteção da superfície. Este método pode ser utilizado para melhorar a capacidade estrutural original do betão degradado ou apenas para melhorar o aspeto arquitetónico. Neste tipo de reparação é essencial garantir uma boa aderência entre o betão de reparação e o betão de base.

4.4.8. REALCALINIZAÇÃO ELETROQUÍMICA DO BETÃO CARBONATADO

Este método tem como objetivo reativar a alcalinidade do meio de modo a recuperar a película passiva das armaduras. Este método não pode ser utilizado quando a causa da deterioração é a contaminação por cloretos, mas é apropriado à contaminação por carbonatação. A realcalinização é feita com base na instalação de um potencial elétrico próximo da armadura principal. Uma das desvantagens deste método é o facto de não bloquear o ingresso de agentes exteriores agressores pelo que deve ser combinado com outro método de reparação.

4.4.9. DESSALINIZAÇÃO

A dessalinização ou extração química de cloretos, tem como fundamento restaurar a película passiva nas armaduras de aço através da redução dos cloretos no interior do betão. Este método é muito semelhante ao anterior, uma vez que consiste na aplicação de uma corrente elétrica contínua entre um ânodo exterior e as armaduras (cátodo). A aplicação da dessalinização não é recomendada em betões que contenham agregados reativos, uma vez que o aumento da alcalinidade do meio pode estimular a ocorrência das reações álcalis-agregados. À semelhança da realcalinização devem ser incluídos outros métodos de proteção.

4.5. BETONAGENS SUBMERSAS E CURA EM AMBIENTE MARÍTIMO

Sendo uma das bases deste capítulo, a prevenção de danos em estruturas de betão de ambiente marítimo importa referir que existem processos de execução que requerem mais especialização do que outros. O cumprimento de certas normas e uma execução rigorosa de estruturas de betão devem ser encaradas como medidas preventivas para o aparecimento de danos posteriores, não só porque dependem da mão humana, mas porque compromete a durabilidade e comportamento da estrutura.

No caso de construções em ambiente marítimo as betonagens submersas são exemplo desses processos que requerem especial atenção.

De acordo com Santhini, as betonagens submersas são usadas há centenas de anos na construção de pontes, barragens e outras fundações que estão vários metros abaixo da superfície da água. Ao longo de vários anos que se tem vindo a melhorar as dosagens e a qualidade da mistura e os métodos de aplicação. Os tipos de betão usados nestas estruturas requerem misturas que evitem a sua “lavagem”, ou seja, que não se disperse na água e misturas que: facilitem a sua auto compactação; evitem a sua segregação e latência; aumentem a viscosidade, coesão e auto-consolidação.

Existem diversos métodos de aplicação nas betonagens submersas nomeadamente método Trémie que consiste num funil cujo fundo irá encaixar num tubo que irá conduzir o betão até ao fundo. Um outro método possível será a bombagem do betão diretamente à sua posição final, quer num alinhamento vertical ou horizontal. A bombagem tem a vantagem de ser mais eficiente operacionalmente pois poupa tempo e trabalho. Para volumes de betão mais pequenos existem sacos apropriados (*toggle bags*) que são enchidos à superfície, conduzidos e abertos no fundo com recurso a mergulhadores.

Já o processo de cura é uma fase bastante importante, não só para a obtenção da resistência mecânica pretendida, como também para questões de impermeabilização e durabilidade. Segundo Mehta (1991), o propósito da cura é prevenir a perda de humidade necessária à hidratação do cimento e controlar a temperatura da reação. Em certas condições climáticas existem processos de cura em que as estruturas poderão ser vaporizadas com água para manter a humidade ou então envoltas em membranas húmidas. Estes métodos criam um efeito húmido, com condições de evaporação que ajudam à cura do elemento, especialmente em climas quentes. Em caso de temperaturas negativas os elementos de betão devem ser protegidos com membranas impermeáveis ou construídos sobre cofragens eletricamente aquecidas ou com recurso a luz infravermelha. Estudos comprovam que betões de alta resistência e baixa permeabilidade correntemente usado nas estruturas marítimas se tornam praticamente impermeáveis entre 3 a 7 dias de cura húmida.

A remoção das cofragens é um outro processo que influencia o ganho de presa e a permeabilidade do betão e que muitas vezes são retiradas precocemente, condicionando o ganho de resistência do betão e favorecendo o aparecimento de fendas.

4.6. ANÁLISE ECONÓMICA DE UMA ESTRUTURA DE BETÃO

Segundo Silva (2007), a manutenção de uma estrutura marítima pode ser abordada de duas formas: reativa e preventiva. Numa abordagem reativa, o dono de obra opta por intervir na reparação da estrutura quando esta já manifesta sinais claros de deterioração e quando a segurança e funcionalidade da construção estão em risco. Numa perspetiva preventiva, executam-se ações de inspeção e manutenção antecipadamente de modo a prolongar o período de degradação. Estas ações de manutenção podem ser por exemplo: medição do potencial elétrico das armaduras, da profundidade de carbonatação e da penetração dos cloretos. A medida preventiva pode levar a custos periódicos de valor significativo, mas será mais eficaz no sentido de não obrigar a um tempo de paragem como muitas vezes acontece nas reparações do tipo reativo. É este balanço económico entre o mau funcionamento de uma estrutura e o custo dos trabalhos de reparação que mais pesa na escolha da solução mais adequada.

A análise que se deve fazer para estimar os custos envolvidos deve ser efetuada com base em diferentes parcelas que incluem:

- Custo inicial da obra (*Construction Costs*), C_c – estes custos incluem o planeamento, projeto de especialidades e a construção propriamente dita;
- Custos de inspeção (*Inspection Costs*), C_i – estes custos contemplam as inspeções regulares que se poderão fazer para ir avaliando o estado de degradação da estrutura, excetuando inspeções especiais que possam surgir de deficiências estruturais;
- Custos de manutenção (*Maintenance Costs*), C_m – os custos de manutenção são os valores despendidos em ações de preservação que mantenham a segurança aos estados limites; à semelhança dos custos de inspeção contemplam apenas pequenas anomalias dispersas no tempo, tendo em conta que esses valores podem revelar-se mais significantes com o avanço da idade da estrutura, podendo mesmo haver a necessidade de intervenções com mais peso no valor;
- Custos de reparação (*Repair Costs*), C_r – estes custos surgem de acordo com uma inspeção preliminar, que deve conter as causas, extensão e gravidade dos danos; pode surgir o caso de substituição total da estrutura em que deverão ser contabilizados os encargos associados ao novo projeto;
- Custos decorrentes da ineficácia da solução de reparação (*Failure Cost*), C_f – estes custos estão associados ao colapso de uma estrutura, pelo que são raros de acontecer e difíceis de quantificar. Associados a estes custos aparecem outros referentes a destruição de património de valor arquitetónico, cultural ou religioso. Uma forma possível de estimar estes custos é com recurso a modelos probabilísticos, que muitas vezes só são contabilizados em projetos de grande importância;
- Custos dos utilizadores (*User Costs*), C_u - resultam dos encargos que os utilizadores da estrutura vão ter devido aos trabalhos de reparação. Dependem da duração das obras e da dimensão da mesma, ou seja, a reparação de uma ponte irá obrigar a que os utilizadores tenham que optar por outro meio para a travessia. Outro exemplo será a reparação de um cais, em que obriga a que os barcos desviem a rota provocando alterações na economia local.
- Valor da estrutura no fim do período de análise (*Salvage Value*), V_s – a estimativa do valor da estrutura no fim do período de análise deverá ser contabilizada quando este período é inferior ao período de vida da solução de reparação (um possível valor será entre $t=0$ e t =tempo de vida útil);
- Benefício retirado com o investimento, R – estes valores estão relacionados com ganhos extras provenientes do investimento, como por exemplo, aumento de receitas numa portagem de uma ponta devido ao aumento da capacidade de tráfego, ou capacidade de atracar navios de maior porte na ampliação de um porto.

De acordo com Silva (2007), resulta o custo global que pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$C_t = C_c + C_i + C_m + C_r + C_f + C_u - V_s - R$$

Existem situações em se pretende comparar uma de duas ou mais soluções possíveis de reparação pelo que nestes casos o custo de construção inicial não será contabilizado pois é comum a todas as soluções. Outro aspeto a ter em conta é o facto de todos os custos terem de ser atualizados para um determinado tempo de referência, que normalmente é a altura em que o investimento é feito. Para tal é necessário prever a taxa de inflação e de juro que varia de país para país.

A secção transversal no tronco, próximo da cabeça, é simétrica e constituída por um núcleo em enrocamento T.O.T., filtros em enrocamento de 1 a 6 tf, mantos em tetrápodes de 30 tf, taludes 2/1 e risbermas de enrocamento de 12 a 15 tf. Essa secção é representada na Figura 5.1.

Inicialmente, a superestrutura era constituída por caixotões, sem base, preenchidos com betão, à cota + 6.0 ZH, com uma transição para os mantos em tetrápodes, constituída por enrocamento de 12 a 15 tf.

A intervenção de 1997 surgiu por iniciativa da atual APA (Agência Portuguesa do Ambiente) e contemplou o aumento do peso dos blocos de enrocamento, a colocação de cerca de 250 novos tetrápodes (apresentados na Figura 5.2), o reperfilamento de parte dos taludes, o alargamento e pavimentação da superestrutura e a construção de bermas.



Figura 5.2 - Vista aérea do esporão com a cabeça parcialmente destruída e os tetrápodes prontos a serem depositados (Velooso Gomes)

A intervenção de 2010 consistiu em nova recarga de 150 tetrápodes no esporão norte para além dos 300 tetrápodes que na mesma empreitada foram colocados no esporão sul.

5.2. DEFINIÇÃO ESTRUTURAL E JUSTIFICAÇÃO PARA A INTERVENÇÃO

A cabeça e o manto eram, até então, constituídos por blocos de betão do tipo tetrápodes que apresentavam um bom desempenho hidráulico, mas fraca estabilidade estrutural pois tendem a partir e a moverem-se quando expostos à agitação marítima. Em resultado desse processo de destruição, manifestamente visível a partir de 2013, foi necessário executar um reforço estrutural e ajustar o comprimento do esporão. As Figuras 5.5 e 5.6 comprovam o cenário de destruição da cabeça do esporão.

Apresentam-se duas hipóteses de mecanismos de colapso, as quais poderão coexistir:

- Por erosão localizada na risberma do pé de talude (Figura 5.3);
- Por deslizamento de conjunto dos tetrápodes do talude (Figura 5.4).

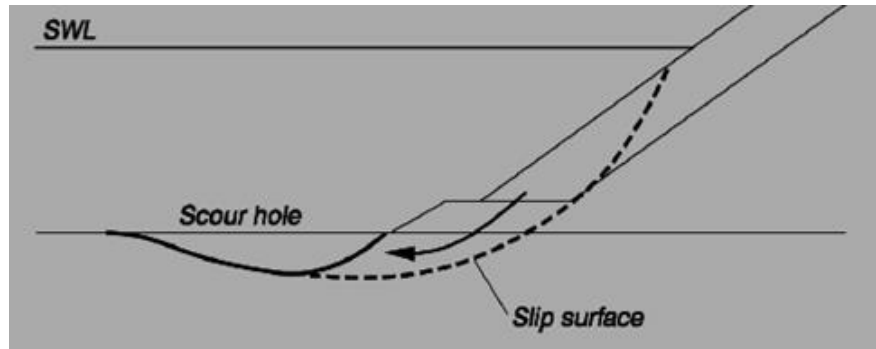


Figura 5.3 - Hipótese de mecanismo de colapso por erosão na risberma do pé de talude (Veloso Gomes)

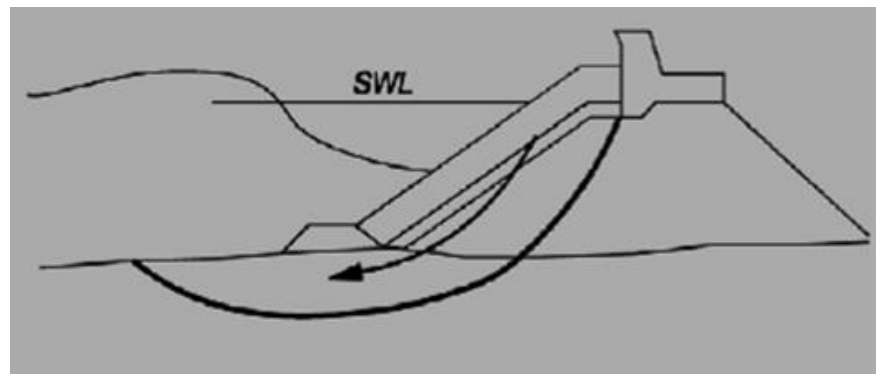


Figura 5.4 - Hipótese de mecanismo de colapso por deslizamento de tetrápodos (Veloso Gomes)



Figura 5.5 - Cabeça do talude parcialmente destruída à data de 2013 (Veloso Gomes)



Figura 5.6 - Imagem representativa da destruição dos blocos e do seu completo desarranjo datada de 2015 (Francisco Piqueiro)

Depois de efetuado o levantamento hidrográfico da Figura 5.7, algo condicionado por razões de segurança e operacionalidade e com o avanço progressivo da destruição do esporão, pondo em causa a defesa costeira da zona, tornou-se evidente a necessidade de intervir. Uma das alterações propostas incluía a mudança de geometria dos blocos da cabeça do tipo tetrápodes para blocos antifor. Os tetrápodes, tal como referido, apresentam uma boa capacidade de imbricamento e proporcionam boas características de permeabilidade e rugosidade, mas manifestam-se frágeis individualmente (estruturalmente) e sofrem bastantes movimentações em relação à sua posição inicial.

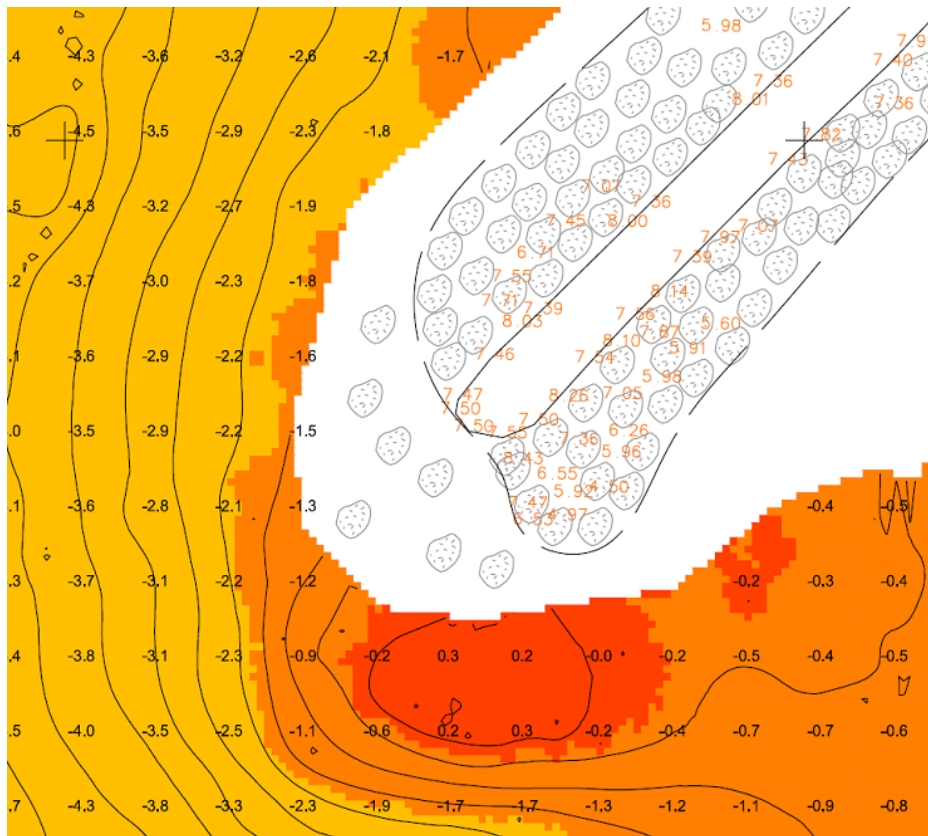


Figura 5.7 - Levantamento hidrográfico (com falha de dados) na área circundante à cabeça do esporão (Nov. 2016 pela empresa LHT, sistema de coordenadas Hayford Gauss datum Lx, cotas referentes ao ZH, 2m abaixo do NM Cascais), (Veloso Gomes, 2016)

5.3. BLOCOS ANTIFER

Em alternativa aos antigos blocos tetrápodes, optou-se pela consideração de blocos antifer que podem ser descritos como blocos prismáticos com semicilindros em quatro das seis faces. Ultimamente têm sido aplicados em situações de agitação marítima intensa como por o exemplo o molhe sul da embocadura do Douro ou o quebramar de Punta Lagostera na Corunha, sendo este último o mais exposto à agitação, a uma escala mundial. Em termos hidráulicos não é tão favorável em termos de minimização de espraamentos e galgamentos da própria estrutura apesar de se revelarem mais robustos que os tetrápodes. Podem ser dispostos de uma forma mais ou menos arranjada, formando mais ou menos vazios entre si. A forma mais “desarranjada” é preferível do ponto de vista hidráulico pois tornam o talude mais rugoso e poroso facilitando a penetração da água e a conseqüente perda de energia. Do ponto de vista visual é mais comum a forma mais “arrumada” como é o caso do molhe sul do Douro.

No caso de Espinho, por se tratar de uma reparação, seria difícil criar uma configuração do tipo arrumada em que os blocos se estendem face com face. Nas Figuras 5.8 e 5.9 apresentam-se exemplos dos blocos Antifer, betonados no estaleiro da HydroStone em Santa Maria da Feira para depois serem transportados em camião para a praia da Baía em Espinho.



Figura 5.8 - Exemplo de blocos antifer recém betonados (Abril de 2018, fonte própria)



Figura 5.9 - Descofragem dos blocos (Abril de 2018, fonte própria)

5.3.1. FICHA TÉCNICA DOS BLOCOS ANTIFER

- Peso dos blocos antifer = 400 kN
- Peso volúmico betão = 24 kN / m³

Geometria dos blocos:

- $H = (V / 1.0247)^{1/3} = (400 / (24 \times 1.0247))^{1/3} = 2.54 \text{ m}$
- $A = 1.086 H = 2.76 \text{ m}$
- $B = 1.005 H = 2.55 \text{ m}$
- $C = 0.095 H = 0.24 \text{ m}$
- $D = 0.024 H = 0.06 \text{ m}$
- $r = 0.1215 H = 0.31 \text{ m}$

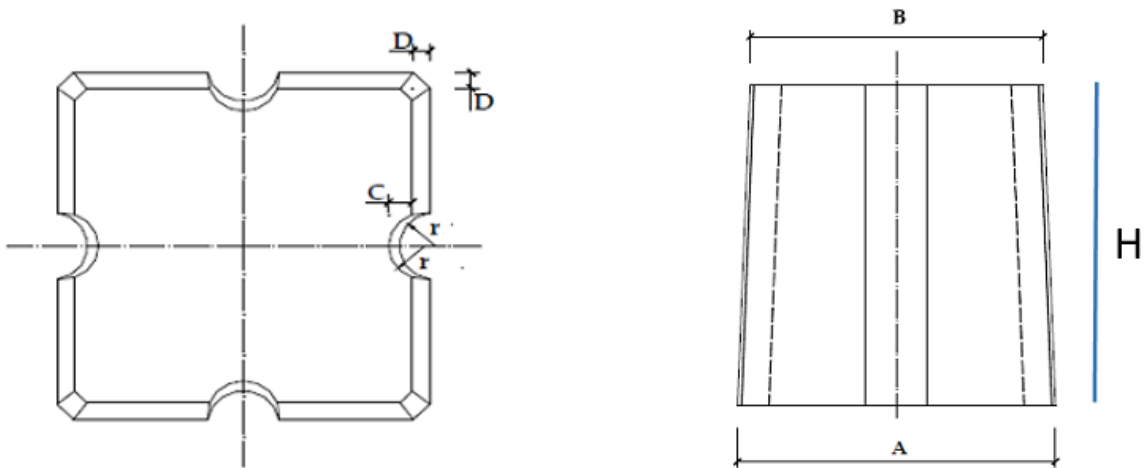


Figura 5.10 – Cortes esquemáticos da geometria dos blocos cúbicos do tipo “antifer” (Veloso Gomes, 2016)

Importa referir, que este tipo de blocos assume dimensões consoante o valor da classe de resistência do betão adotado, tal como se pode verificar na expressão H da ficha técnica da Figura 5.10. Ou seja, um betão de classe resistência mais abaixo iria conduzir a dimensões maiores para manter um mesmo peso de 400 kN. A Figura 5.11 representa a reconstrução pretendida na cabeça do esporão, com recurso aos novos blocos antifer.

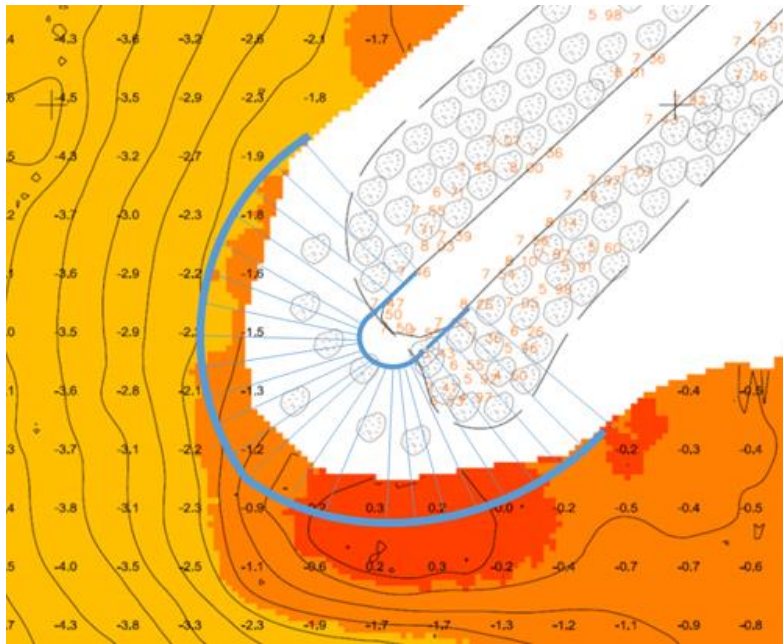


Figura 5.11 - Esquema representativo da reconstrução da cabeça do esporão (Veloso-Gomes 2016)

5.4. CÁLCULO ESTRUTURAL

Este tipo de projetos é condicionado pelas alturas de onda que incidirão na estrutura, que por sua vez dependem da profundidade de água. As ondas provenientes sofrem o fenómeno de empolamento assim que se aproximam da cabeça do esporão. A máxima altura de onda, $H_{m\acute{a}x}$ que pode ocorrer, sem rebentar, à profundidade d (cota do fundo acrescida de 4.0 m) é da ordem de $0.78 \times d$. Com o auxílio do levantamento batimétrico foi possível obter alguns valores de $H_{m\acute{a}x}$, como se apresenta no Quadro 5.1.

Cota do fundo (m)	Altura de água em PM (m)	$H_{m\acute{a}x}$ (m)
-2	6	4,68
-2,5	6,5	5,07
-3	7	5,46
-3,5	7,5	5,85
-4	8	6,24
-4,5	8,5	6,63
-5	9	7,02

Quadro 5.1 - Altura de onda em função da cota do fundo

Estas alturas de onda têm uma elevada probabilidade de ocorrência pelo que se dispensam estudos probabilísticos adicionais com incidência nos Períodos de Retorno. Associado a uma cota de fundo de -4 m obtém-se uma altura de onda de 6.24 m a qual foi adotada como onda de projeto.

De seguida, é necessário determinar o peso unitário dos blocos que irá depender dessa onda de projeto e também do peso volúmico do betão a usar. Para isso existem duas formulações: a formulação de van der Meer e a formulação de Hudson. A primeira tem a restrição de ser aplicável para situações de agitação não limitada pela profundidade e sem que ocorram galgamentos na estrutura, o que não é o caso. A formulação de Hudson permite determinar o peso unitário, W dos blocos (kN) e é do tipo:

$$W = \frac{\gamma_r H^3}{K_D \Delta^3 \cot \theta}$$

- γ_r – peso volúmico do material dos blocos (kN/m³);
- H – altura de onda de projeto na base do talude (m);
- K_d – coeficiente de estabilidade adimensional, proposto a partir de resultados laboratoriais e dependente do tipo de blocos e outros fatores;
- $\Delta = (\rho_r / \rho_w - 1)$
- $\rho_r e \rho_w$ – massa volúmica do material dos blocos e da água do mar;
- θ – ângulo do talude com a horizontal;

Nível de danos	Kd	
	Talude 1:1,5	Talude 1:2
Início	3,9 - 5,3	2,9 - 4,0
Moderados	8,1 - 12	3,1 - 8,8

Quadro 5.2 - Valores de Kd (adaptado de Coastal Engineering Manual, 2006)

O dimensionamento dos blocos prosseguiu tendo em conta algumas considerações e adotou-se (Quadro 5.3):

- duas hipóteses para o peso volúmico do betão (normal e de elevada densidade);
- valores do coeficiente de estabilidade $K_D = 4, 3$ e 6 , considerando-se o valor de 4 como o mais adequado;
- alturas de onda de projeto no pé da estrutura de 6.24 m e 7.02 m, considerando 6.24 m como a mais adequada às profundidades locais existentes;
- cotangentes do ângulo de talude de $1/1, 3/2$ e $2/1$, considerando $2/1$ como o mais adequado.

De acordo com o que foi sendo explicado o valor de 400 kN (40 tf) foi o peso determinado para cada bloco, sendo superior aos que já ali se encontravam (30 tf).

Peso volúmico betão (kN/m ³)	K _d	Altura de onda de projeto H _d (m)	Talude (cotg)	Peso dos blocos (kN)	
24	4	6,24	1/1	531	
			3/2	354	
			2/1	266	
32 (elevada densidade)		7,02	2/1	380	
			6,24	1/1	283
				3/2	189
2/1	142				
24	6	6,24	2/1	356	
				178	

Quadro 5.3 - Diferentes cenários para obtenção do peso dos blocos de acordo com a formulação de Hudson (Veloso Gomes, 2016)

O novo talude, troco-cónico, será constituído por duas fiadas de cubos antifer de 40 tf, com talude de cotangente 2/1.

A superestrutura será prolongada com mais quatro cubos (cerca de 4 x 2.7 m) no alinhamento da diretriz da plataforma existente, ficando com a superfície superior à cota + 8 ZH, portanto a uma cota superior da plataforma existente no coroamento.

O talude onde assentam as fiadas de cubos terá de ser regularizado com enrocamento.

A cota inferior do talude em cubos terá de ser aferida com novo levantamento hidrográfico e em obra, considerando-se que poderá localizar-se entre as cotas -3.0 e -1.0 ao Zero Hidrográfico.

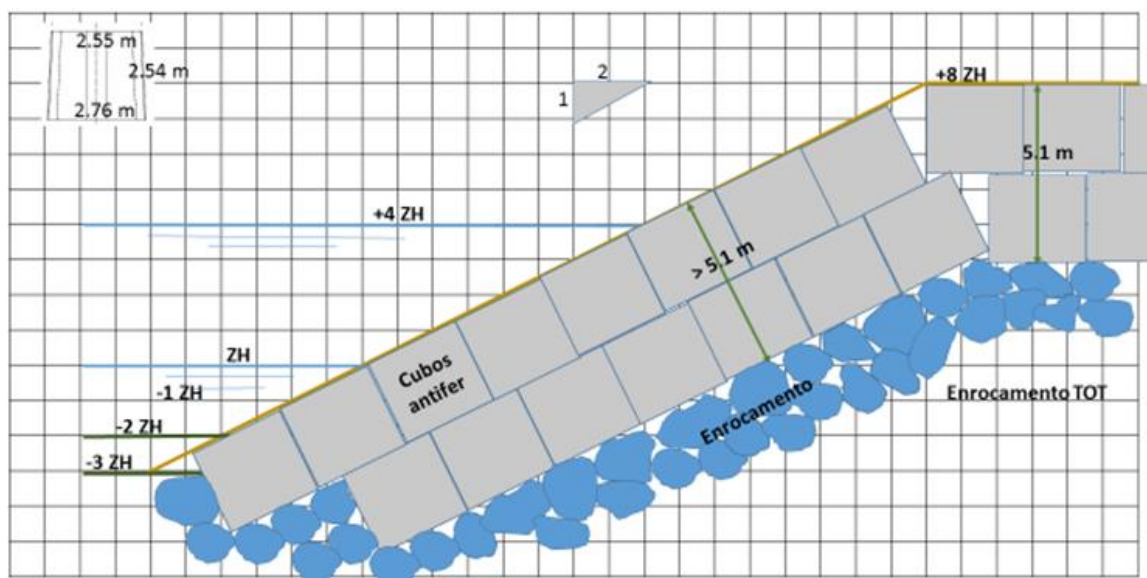


Figura 5.12 - Perfil tipo da rotação da cabeça; duas fiadas de cubos antifer de 40 tf, com talude de cotangente 2/1; Superestrutura com mais quatro cubos no alinhamento da diretriz da plataforma existente, à cota + 8 ZH; (quadrículas de 1m de largura) (Veloso Gomes, 2016)

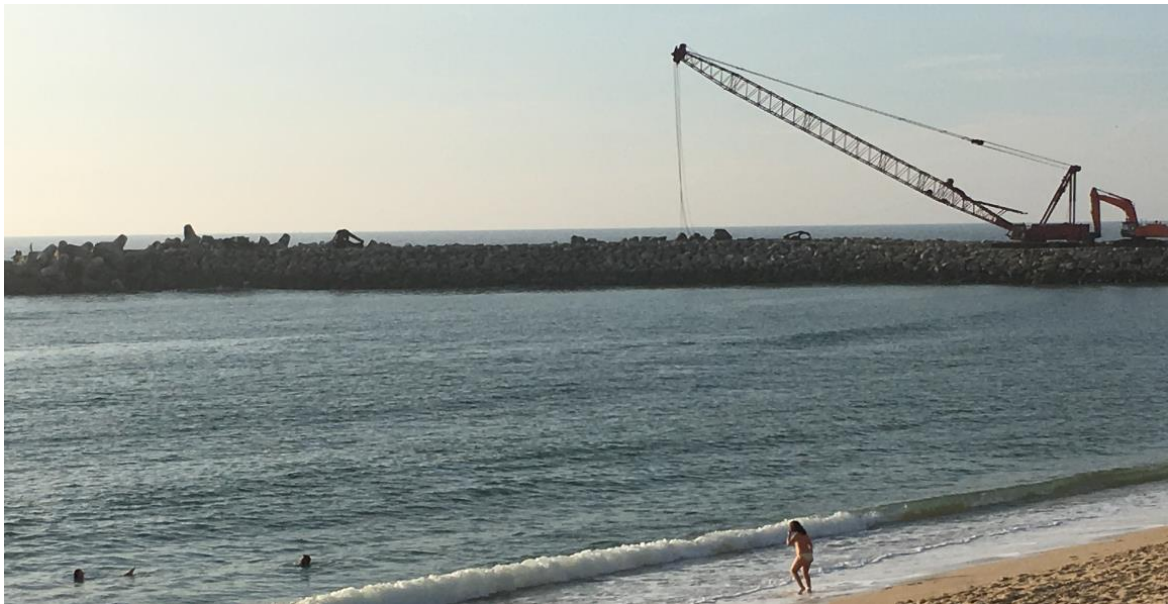


Figura 5.13 - Decorrer das obras com remoção de alguns tetrápodes (Setembro de 2018, fonte própria)

5.5. OPERAÇÕES PREVISTAS E EXECUTADAS

No Projeto de Execução foram previstas as seguintes operações as quais foram concretizadas em 2018:

- Realização de levantamentos topo - hidrográficos dos esporões, a realizar antes e depois da intervenção (incluindo o coroamento, paramentos e risberma da estrutura e uma faixa submersa até ao -5 ao ZH), utilizando sonar lateral em boas condições de maré, agitação e turvação da água;
- Construção, manutenção e desmonte de um estaleiro;
- Preparação e desmontagem de um parque vedado de depósito provisório dos blocos pré-fabricados;
- Fornecimento e colocação de *tout-venant*, sobre tela de geossintético, no caminho de acesso sobre o areal ao esporão. Desmontagem do acesso com reposição das condições iniciais.
- Fornecimento e colocação de *tout-venant*, sobre tela de geossintético, no caminho de acesso na marginal urbana pavimentada. Desmontagem do acesso com reposição das condições iniciais.
- Fornecimento e colocação de enrocamento, com pesos de 4 a 6 tf, de forma a reconstituir o talude de rotação da cabeça para assentamento dos blocos.
- Fabrico, transporte e colocação de blocos cúbicos tipo “antifer”, pré-fabricados, maciços, em betão de alta qualidade (ambiente marítimo), com peso unitário de 40 tf, na cabeça do esporão, incluindo cofragens e aditivos.
- Trabalho de equipamento elevatório de grande porte para reposicionamento de blocos existentes deslocados, nomeadamente tetrápodes, incluindo montagem e desmontagem do equipamento.
- Fornecimento e colocação de betão para rematar o capeamento da superestrutura junto dos blocos no coroamento.

5.6. COMPOSIÇÃO DO BETÃO DA ÚLTIMA REABILITAÇÃO

O betão utilizado nos blocos antifer foi fabricado pela empresa ABTF, Lda a solicitação do Empreiteiro.

- Classe de resistência à compressão: C35/45
- Classe de exposição ambiental: XS3(zona de marés, de rebentação ou de salpicos) – corrosão induzida por Cl da água do mar;
- Betão de massa volúmica normal;
- Dimensão máxima do agregado: D22 mm (areia e brita);
- Razão água/ligante: 0.41

De acordo com a empresa produtora os elementos produzidos apresentavam muito bom acabamento de superfície; não necessitava de grande energia de vibração; não apresentava sinais de segregação, pelo que dispensa o uso de adjuvantes.

Sabe-se ainda que os blocos foram produzidos a um ritmo médio de 5/dia sendo necessários 240 blocos antifer, com a composição apresentada no Quadro 5.4.

- **Agregados:** os agregados escolhidos são duas areias com massas volúmicas de 2.64 e 2.50 mg/m³ e duas britas ambas com massas volúmicas de 2.73 mg/m³ fornecidas respetivamente pelas empresas Misturas Milenares e Iberobritas;
- **Cimento:** o cimento utilizado é da classe CEM I 52.5 R com massa volúmica de 3.15 mg/m³ fornecido pela Cimpor. Havia no entanto uma anotação nas fichas técnicas que também remetia para um betão equivalente IV (B), sendo este um dos betões apropriados a trabalhos marítimos;
- **Teor de ar:** 1.2 Vol. % ;
- **Adições:** cinzas volantes fornecidas pela Tejo Energia (Central Termoelétrica do Pêgo);
- **Adjuvantes:** superplastificante FM830 do Grupo BASF;
- **Água:** água retirada de um furo e água reciclada do fabrico de betão pronto;

Composição para 1 m ³ de betão fresco		
Categoria	Produtos	Quantidade (kg/m ³)
Agregados	Areia 0/2	296
	Areia 0/4	605
	Brita 8/14	338
	Brita 11/22	648
Ligante	Cimento CEM I 52,5 R	215
Adições	Cinzas volantes	130
Adjuvantes	Superplastificante Woerment FM 830 (BASF)	1,86
Água	-	140
Massa de betão fresco		2374

Quadro 5.4 - Composição de betão utilizada na última reparação de 2018 nos blocos antifer (HydroStone)

Numa breve análise à composição verifica-se que foram aplicados cerca de 1900 kg de agregado que juntamente com os restantes constituintes perfazem o total de 24 kN/m³ estipulados no projeto. A relação A/C na ordem dos 0,4 vai de encontro ao abordado no Capítulo 2, ou seja, baixas relações água-cimento

são as mais adequadas, nomeadamente quando se pretende uma composição com baixa permeabilidade e porosidade.

5.7. COMPOSIÇÕES DE BETÕES DE EMPREITADAS ANTERIORES

Tal como já foi referido, no ano de 2010 o esporão já havia sido alvo de uma reabilitação. Nesta altura ainda os blocos eram do tipo tetrápodes e a empreitada foi levada a cabo pela empresa Irmãos Cavaco, S.A., atual HydroStone. Apesar de se ter acesso à composição que estava previamente estipulada para o fabrico dos blocos, sabe-se que esta foi alterada na altura da produção devido a uma grave falha de fornecimento de cinzas volantes no mercado. Contudo, a fiscalização da obra aprovou uma nova composição definida pela secção de Materiais de Construção da FEUP que se expõe no Quadro 5.5.

Os agregados desta composição, inicialmente prevista, tiveram origem na pedreira da Irmãos Cavaco S.A., em Santa Maria da Feira e eram de três tipos diferentes. A areia fina proveniente de uma extração com controlo de produção certificado situada em Ovar.

A areia grossa teve origem nas mesmas condições mas extraída em Miranda do Corvo.

O ligante hidráulico foi obtido através da mistura, feita no momento da amassadura do betão de: cimento Portland CEM II 42.5 R A-L e cinzas volantes. As cinzas surgem com o intuito de melhorar a trabalhabilidade, facilitar a bombagem, e controlar a velocidade de presa do betão.

A água de amassadura teve origem num furo de captação na sede da Irmãos Cavaco, a qual verificava conformidade com as normas.

Como adjuvante foi utilizado um redutor de água da Sika (Sikament 200 Univ) com vista a melhorar as resistências mecânicas, a uniformidade, o acabamento superficial e a impermeabilidade do betão.

Foram ensaiados dois betões para diferentes classes de exposição (XA1 e XA2) referentes a ataques químicos ligeiros e moderados no qual se inclui o contato com água do mar. Os betões seriam da classe C30/37 e C 35/45 com um D_{max} de 32 mm.

Composição para 1 m ³ de betão fresco				
Categoria	Produto	Quantidades (kg/m ³)		
		Betão C30/37 S2 D32 XA1	Betão C35/45 S2 D32 XA2	Betão C35/45 S2 D32 XA1
Agregados	Areia fina	275	270	485
	Areia grossa	410	400	330
	Agregado Grosso 8/20	305	305	265
	Agregado Grosso 12/32	340	335	270
	Agregado Grosso 4/10	375	370	470
Ligante	Cimento CEM II 42,5 R A-L	310	340	370
Adições	Cinzas Volantes	90	100	-
Adjuvantes	Sikament 200 Univ	4	4,4	3,7
Água	-	180	190	167
Massa de betão fresco		2289	2314	2361

Quadro 5.5 - Composições de betão ensaiadas para a reabilitação dos blocos tetrápodes (Irmãos Cavaco, 2009)

Numa comparação entre as diversas composições verifica-se que no ano de 2010 as utilizações de cinzas volantes foram reduzidas em relação à última composição (2018) e numa das composições de 2010 nem foram incluídas na composição, pelo que se verifica, em relação às mesmas composições dessa ano, um

substancial aumento de agregados finos e um ligeiro decréscimo de agregados grossos, coincidindo com a maior dosagem de cimento e menor de água.

Em 2018 foram usadas dosagens de cimento ainda mais elevadas, apesar de se incluir a maior quantidade de cinzas volantes na composição.

6

CONCLUSÕES

6.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O desenvolvimento deste tema permitiu comprovar a importância que o betão tem, como material largamente utilizado em obras portuárias e de defesa costeira. Tais utilizações devem-se por um lado à sua produção relativamente simples com constituintes de fácil obtenção na natureza. Também a evolução que acompanha a engenharia civil permitiu implementar vários documentos de carácter normativo que servem de suporte à utilização do betão em várias fases de uma obra (desde o projeto até à desconstrução).

No que diz respeito às suas propriedades, o betão é capaz de desenvolver a sua capacidade resistente num curto período inicial e mantê-la durante vários anos, mesmo que inserido em meios mais agressivos. Uma das vantagens da sua utilização é o facto de se poder gerir algumas dessas propriedades através da mistura dos constituintes, como por exemplo a relação água-cimento ou a escolha da granulometria dos agregados que conduzirão a betões com maior ou menor trabalhabilidade, impermeabilidade, porosidade e que por sua vez interferem na durabilidade do betão uma vez que a penetração de agentes externos depende essencialmente da permeabilidade do betão.

Outro aspeto a retirar deste tema é a diversidade de ataques a que o betão está sujeito no meio marítimo. De facto é um ambiente caracterizado por vários agentes que interferem diretamente com as estruturas de betão e que tendem a acelerar a sua deterioração. A água do mar é um desses exemplos devido à existência de sais (cloretos, sulfatos,...), a oscilação da maré, agentes biológicos e orgânicos que atacam a pasta de cimento e as armaduras. Também a influência da temperatura provoca no betão ciclos de expansão e retração que condicionam o seu comportamento ou acelera reações químicas que potenciam ataques aos elementos.

A escolha do betão a utilizar numa determinada estrutura é consequência da classe de exposição. A grande diversidade de estruturas de betão na linha costeira (estruturas de defesa costeira, cais, quebra-mares, etc.) pode expô-las a vários tipos de exposições, consoante as funções que desenvolvem. São exemplo as zonas submersas, zonas emersas, zonas de salpicos, zonas de rebentação, etc. Estas alternâncias condicionam o comportamento do betão e afetam a sua longevidade. Apesar dos projetos preverem a agressividade destes meios existe uma grande incerteza associada pois não é possível controlar fenómenos naturais e verifica-se que ainda existem lacunas no desenvolvimento de modelos de durabilidade até porque muitos se baseiam em modelos probabilísticos.

Pelo facto de as estruturas nem sempre durarem o previsto nas condições ideias torna-se necessário executar ações de manutenção que são possíveis com recurso a várias técnicas. É importante salientar

que a implementação de uma estrutura de betão envolve vários agentes ou intervenientes (dono de obra, projetista, empreiteiro, fiscalização, utilizador) todos eles com responsabilidades para a sua durabilidade.

No que diz respeito ao caso de estudo verifica-se que o esporão de Espinho se encontra numa zona de forte agitação marítima, como a que se verifica em quase toda a costa portuguesa, que desgasta mais rapidamente os blocos. Apesar da sua função ser proteger a zona costeira dessa mesma agitação, é uma solução que obriga a várias intervenções, pelo que já existiram três (1997, 2010, 2018) desde a sua construção e com várias soluções diferentes. A geometria dos blocos já foi alterada em relação à época de construção (1981) e as composições de betão também já foram alteradas, comprovando que para as mesmas condições de exposição são diversas as opções de resposta.

Apesar da vasta informação disponível sobre o betão, toda ela bastante unânime, uma das dificuldades sentidas relaciona-se com a ligação das estruturas de betão convencionais para estruturas concebidas para atuar em ambiente marítimo. Numa fase de projeto, a escolha de betão segue a mesma linha de uma estrutura convencional, de acordo com as propriedades pretendidas e o meio onde irá ser inserida mas na fase de construção as técnicas e os meios já são bastante diferentes. Por exemplo: as execuções de trabalhos marítimos exigem condições que dependem da maré e da agitação marítima; a construções do tipo quebramar exige pré-fabricação de elementos que por sua vez exigem estaleiros de grandes dimensões. A previsão de modelos de durabilidade fica desde logo condicionada, não só pela dificuldade da execução deste tipo de trabalhos como também pelas adversas condições. Salienta-se também que as técnicas de reparação de estruturas marítimas, como por exemplo, um cais, já se assemelham às técnicas usadas numa estrutura de betão convencional.

Por último, é importante referir que as alterações climáticas podem induzir ações energéticas mais elevadas, mais frequentes e persistentes o que aliado à subida do nível médio das águas do mar terão impacto nas estruturas marítimas, uma vez que foram projetadas para determinadas condições..

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A temática deste trabalho estará sempre presente nas preocupações dos engenheiros que trabalham com estruturas portuárias e costeiras.

Na continuação do presente estudo e exigindo uma calendarização muito mais alargada seria interessante:

- Obtenção de dados sobre composições de betão utilizados na construção (1982) e na primeira intervenção no Esporão de Espinho (1997);
- Monitorização do comportamento e das alterações sofridas pelos blocos no esporão de Espinho (tetrápodes mais antigos e cubos antifer de 2018).
- Carotagem de elementos para posterior análise;
- Medição de resistências mecânicas ao fim de um período de tempo em serviço (10/15 anos);
- Realização de ensaios de longa duração com várias composições de betão mergulhadas em água do mar sob a forma de provetes;
- Avaliação de composições de betão que não incorporem cinzas volantes devido ao encerramento (previsto) de centrais termoelétricas, em virtude do aparecimento de novas soluções mais ecológicas;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alexander, M. *Marine Concrete Structures Design Durability and Performance*, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, sem data
- Appleton, J. *Construções em Betão – nota histórica sobre a sua evolução – Apontamentos IST*, 1997
- Appleton, J. *Betão Armado e Pré-Esforçado II Folhas de Apoio às Aulas Módulo I*, IST, Lisboa, 2005
- Azevedo, R. *Reparação de Estruturas de Betão Armado em Ambiente Marítimo*. ISEP, Porto, 2016
- Cachim, P. *A Especificação do Betão segundo a NP EN 206-1*, Universidade de Aveiro, sem data
- Catarino, J. *Normalização Europeia no âmbito da Reparação*, LNEC, Lisboa, sem data
- Clifton, J. e Knab L. *Impact Testing of Concrete*, 1983
- Colleparidi, M. *Concrete Durability in a Marine Environment*, 2008
- Costa, A. *Durabilidade de Estruturas de Betão Armado em Ambiente Marítimo*. Dissertação de Doutoramento, IST, Lisboa, 1997
- Costa, A e Appleton, J. *Análise da Penetração de Cloretos em Estruturas de Betão Armado Expostas ao Ambiente Marítimo*, Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas nº46, 1999
- Costa, A e Appleton, J. *Reabilitação e Reforço de Estruturas – Apontamentos IST*, 2012
- de Brito, J. e Flores, I. *Diagnóstico, Patologia e Reabilitação de Construções em Betão Armado*, IST, 2005
- Ferreira, R. *Avaliação de ensaios de durabilidade de betão*, U. Minho, Guimarães, 2000
- Ferreira, R. *Probability-Based Durability Analysis Of Concrete Structures in Marine Environment*, U. Minho, Guimarães, 2004
- Ferreira, R. *Optimização da vida útil das Estruturas de Betão Armado*. 4as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Lisboa, 2006
- Gjorv, O. *Durability of Concrete Structures*, NTNU, 2011
- Lopes, H. *Ensaio em Modelo Físico do Comportamento Hidráulico e Estrutural do Quebra-Mar Norte do Porto de Leixões*, FEUP, Porto, 2005
- Loza, P. *Sand Bypassing Systems*, 2008

- Marques, J. C. *Betão. A Solução Natural na Construção, Evolução e Novos Desafios*, Betão Liz, formação FEUP, 2016
- Mehta, P. K. *Concrete in the Marine Environment*, Department of Civil Engineering - University of California at Berkeley, USA, 1991
- Miranda, A. *Influência da proximidade do mar em estruturas de betão*, FEUP, Porto, 2006
- Neville, A. e Brooks, J. *Concrete technology*, 2nd Edition, 2010
- NP EN 206-1 2007 *Norma Portuguesa, Betão: Especificação, desempenho, produção e conformidade*
- Pereira, D. *Avaliação do Tempo de Vida Útil de Estruturas Marítimas – Aplicação à Ponte Cais do Porto de Leixões*, Universidade do Minho, 2016
- Pinheiro, J. *Avaliação dos Processos de Transposição Artificial de Sedimentos em Embocaduras*, FEUP, Porto, 2008
- Preto, P. *Aplicação de Pré-Esforço Exterior como Técnica de Reforço de Estruturas*, IST, Lisboa, 2014
- Raupach, M. e Buttner, T. *Concrete Repair to EN 1504 - Diagnosis, Design, Principles and Practice*, 2014
- Ribeiro, T. *Processos de Construção e Fiscalização de Obras Portuárias*, FEUP, Porto, 2011
- Rodrigues, F. A. *Modelos de Gestão de Degradação de Infraestruturas Portuárias*, IST, Lisboa, 2011
- Salta, M. *Prevenção da Corrosão nas Estruturas Marítimas em Betão Armado*, LNEC, Lisboa, 2014
- Santhini, P. *Underwater Concrete*, sem data
- Santos, T. *Corrosão das Armaduras do Betão Armado Causas Consequências, Prevenção e Projeto de Durabilidade*, ISEL, 2014
- Saraiva, F. *Estruturas Pré-Fabricadas em Betão*, IST, Lisboa, 2012
- Serra, A. H. *Análise de Patologias em Estruturas Construídas em Ambiente Marítimo*, FEUP, Porto, 2012.
- Silva, T. *Análise Técnico-Económica de Alguns Tipos de Reparações de Estruturas de Betão Armado expostas a um Ambiente Marítimo*, IST, Lisboa, 2007
- Sousa, N. *Obras Marítimas de Acostagem: o Caso do Porto de Abrigo da Ilha do Porto Santo*, Universidade da Madeira, 2011
- Thaulow, N. *Carbonation of concrete structures*, USA, 2007,
- Tuutti, K. *Corrosion of steel in concrete*, Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982

Veloso Gomes, F., Taveira Pinto, F., Lopes, H., Brogueira Dias, E., Rosa Santos, P., *Estudo em Modelo Físico da Eficiência Hidráulica à Reflexão de Blocos Verticais Perfurados*, FEUP, 2007

Veloso Gomes, *Apontamento de Trabalhos Marítimos 2*, FEUP, 2017

Páginas da Internet

Site: <http://www.hidrografico.pt/>

Site: www.mapei.com/public/PT/menu/Brochura%20Degradacao%20do%20betao_web.pdf

Site: www.etermar.pt

Site: www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/aplicacoes/projecto-de-defensas/cais-de-acostagem/

Site: <http://www.aprh.pt/rgci/glossario/esporario.html>