

DM

Corrosão das Armaduras Não Estruturais em Elementos de Betão Armado

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Sérgio Boris Gouveia Alves

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL



UNIVERSIDADE da MADEIRA

A Nossa Universidade

www.uma.pt

fevereiro | 2016

Corrosão das Armaduras Não Estruturais em Elementos de Betão Armado

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Sérgio Boris Gouveia Alves

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ORIENTADOR

Lino Manuel Serra Maia



Corrosão das armaduras não estruturais em elementos de betão armado

Tese submetida para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na
Universidade da Madeira

por

SÉRGIO BORIS GOUVEIA ALVES

Orientador

Lino Manuel Serra Maia

(Universidade da Madeira)

Versão para discussão – fevereiro de 2016

Título: Corrosão das armaduras não estruturais em elementos de betão armado

Palavras-chave: Armaduras; Betão; Corrosão; Deterioração.

Keywords: Armor; Concrete; Corrosion; Deterioration.

Autor: SÉRGIO ALVES

FCEE – Faculdade de Ciências Exatas e da Engenharia

Campus Universitário da Penteada

9020 - 105 Funchal – Portugal, s/n

Telefone + 351 291 705 230

Correio eletrónico: secretariado.cccee@uma.pt

Funchal, Madeira

“Don't only practice your art,
But fORce youR way into Its Secrets,
for it and knowledge can
raise men to the divine.”

Ludwig Van Beethoven

RESUMO

A corrente dissertação enquadra-se na temática da corrosão das armaduras mais concretamente nas armaduras mínimas, não estruturais e construtivas. É frequente encontrarmos sinais de degradação em estruturas e elementos de betão armado, maioritariamente causado pela corrosão das armaduras. Tais armaduras por vezes não têm solicitações estruturais, desta forma estuda-se a hipótese de as mesmas terem sido dispensadas no momento de conceção da estrutura ou do elemento. Tem-se em conta todos os fatores que podem influenciar a corrosão de forma a entender o seu comportamento, assim como o seu enquadramento legislativo. São inúmeras as causas de corrosão prematura das armaduras, como a elevada porosidade do betão, a utilização dos materiais errados de acordo com o ambiente, o recobrimento insuficiente, entre outros. Contudo o processo de corrosão é provocado apenas pela carbonatação e/ou cloretos existentes no betão que destrói a película passiva das armaduras.

Elaborou-se análises em casos mais usuais com degradação acentuada. Assim, apenas analisou-se casos onde a corrosão era visível, uma vez que a análise se baseou apenas na observação visual, e ignorou-se os restantes casos devido á incerteza da existência de corrosão, mesmo em ambientes agressivos. Em todos os casos teve-se em conta o comportamento químico e físico, do betão e das armaduras de forma a compreender as causas da degradação e suas consequências, assim como outros parâmetros como por exemplo a temperatura.

Com base nos dois parágrafos anteriores, e com recurso ao levantamento fotográfico de alguns elementos e estruturas de betão armado, analisou-se neste trabalho 8 casos não estruturais e 2 casos estruturais referente à aplicação das armaduras.

ABSTRACT

The current dissertation is part of the theme of steel corrosion, specifically minimum, non-structural and constructive reinforcement. We often find signs of degradation on reinforcement concrete elements and structures, mainly caused by reinforcement corrosion. Such reinforcement sometimes doesn't have structural requests, so i studied the hypothesis of them being removed at the time the structure or element was build. I took in to account all the influence factors to corrosion, in order to understand its behaviour, as well its legislative framework. There are numerous causes of premature corrosion of reinforcement, such as high concrete porosity, the use of wrong materials according the current environment, insufficient coverage, among others. However, the corrosion process is caused only by carbonation and/or chlorides the exist in concrete, those will destroy the reinforcement passive film.

I elaborated analysis in more usual severe degradation cases. Thus, I only analysed cases where corrosion was visible, since the analysis is based on visual observation, and I ignored other cases due to the uncertainty of the existence of corrosion, even in harsh environments. In all cases I took into account the chemical and physical concrete behaviour in order to understand the degradation causes and consequences, as well as other parameters such as temperature.

Based on the previous two paragraphs, and using photographic survey of some concrete elements and structures, I analysed in this work 8 non-structure and 2 structural cases, concerning the application of reinforcement.

ÍNDICE

Resumo.....	v
Abstract	vii
Índice.....	ix
Índice de figuras	xiii
Índice de quadros	xvii
Lista de acrónimos e simbologia	xix
Termos e definições.....	xxi
Agradecimentos.....	xxiii
1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.1. Introdução.....	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Contribuições científicas e limitações	3
1.4. Estrutura da dissertação	3
2. ESTADO DA ARTE.....	5
2.1. Composição e comportamento Estrutural do Betão	5
2.1.1. Constituintes do betão.....	6
2.1.1.1. Cimento	6
2.1.1.2. Agregados.....	7
2.1.1.3. Água de amassadura	7
2.1.1.4. Adições	8
2.1.1.5. Adjuvantes.....	8
2.1.2. Caraterísticas físicas do betão	9
2.1.2.1. Resistência à compressão	9
2.1.2.2. Resistência à tração.....	9
2.2. Composição e comportamento Estrutural do Aço.....	10
2.2.1. Composição química	10
2.2.2. Comportamento estrutural	11
2.3. Patologias no Aço	11
2.3.1. Carbonatação.....	11
2.3.1.1. Mecanismo da Corrosão	13
2.3.1.2. Teor de humidade	15
2.3.1.3. Razão água-cimento e temperatura.....	16

2.3.1.4.	Tipo de cimento.....	17
2.3.2.	Cloretos	17
2.3.2.1.	Penetração dos cloretos	18
2.3.2.2.	Limite crítico de cloretos	20
2.3.3.	Carbonatação e cloretos em simultâneo.....	23
2.3.4.	Corrosão das armaduras	23
2.3.4.1.	Corrosão uniforme	24
2.3.4.2.	Etapas da corrosão	25
2.4.	Patologias no betão.....	26
2.4.1.	Fendilhação	26
2.4.2.	Delaminação.....	27
2.4.3.	Desagregação e erosão do betão	28
2.4.4.	Infiltrações.....	29
2.4.5.	Deformações	30
2.4.6.	Deterioração causada por erros/deficiências.....	31
3.	ENQUADRAMENTO LEGISLATIVO.....	33
3.1.	NP EN 206-1 2007	33
3.1.1.	Classificação	33
3.1.2.	Requisitos para o betão	36
3.1.2.1.	Teor de cloretos.....	36
3.1.3.	Valores limite recomendados para a composição do betão	37
3.2.	Especificação LNEC 464 2007	37
3.2.1.	Degradação do betão e as classes de exposição.....	38
3.2.2.	Prescrições para a composição do betão	40
3.2.2.1.	Prescrições para vida útil de 50 anos	40
3.2.2.2.	Prescrições para vida útil de 100 anos	42
3.2.3.	Combinações de classes de exposição	42
3.2.4.	Recobrimentos mínimos	43
3.3.	Eurocódigo 2 parte 1-1 (NP EN 1992-1-1 2010)	44
3.3.1.	Classes de resistência e de exposição	44
3.3.2.	Recobrimento mínimo	44
3.3.3.	Controlo da fendilhação	45
3.3.3.1.	Armaduras mínimas.....	46
3.3.4.	Armadura não estrutural e construtiva.....	47
3.4.	Regulamento de estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado	47
3.4.1.	Fendilhação	47

3.4.2.	Recobrimento mínimo das armaduras	48
3.4.3.	Armadura mínima, não estrutural e construtiva	49
4.	CASOS DIVERSOS.....	51
4.1.	Caso não estrutural 1.....	51
4.2.	Caso não estrutural 2.....	58
4.3.	Caso não estrutural 3.....	60
4.4.	Caso não estrutural 4.....	62
4.5.	Caso não estrutural 5.....	65
4.6.	Caso não estrutural 6.....	70
4.7.	Caso não estrutural 7.....	74
4.8.	Caso não estrutural 8.....	75
4.9.	Caso estrutural 1.....	76
4.10.	Caso estrutural 2.....	81
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	89
5.1.	Notas finais.....	89
5.2.	Conclusões.....	89
5.3.	Perspetivas futuras.....	90
	REFERÊNCIAS.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Relevância das causas de deterioração do betão (2)	2
Figura 2.1 – Dimensões dos cubos e cilindros para teste de resistência segundo NP EN 12390-3 .	6
Figura 2.2 – Consequência da variação da quantidade de carbono presente nas armaduras	10
Figura 2.3 – Proteção das armaduras no betão	12
Figura 2.4 – Despassivação das armaduras no betão.....	12
Figura 2.5 – Penetração do carbono no recobrimento em geral (18)	13
Figura 2.6 – Volume relativo dos produtos da corrosão (25)	14
Figura 2.7 – Fendilhação à esquerda e delaminação à direita do betão.....	15
Figura 2.8 – Três casos distintos relativamente ao teor de humidade (da esquerda para a direita - ambiente seco; ambiente com elevado teor de humidade; ambiente saturado) (2).....	16
Figura 2.9 – Velocidade da carbonatação de acordo com o teor de humidade (2).....	16
Figura 2.10 – Influência da razão água-cimento e temperatura na profundidade de carbonatação adaptado de (2)	17
Figura 2.11 – Profundidade de penetração cloretos da experiência de Zhiwu Yu (35)	19
Figura 2.12 – Formas de aparecimento dos cloretos.....	20
Figura 2.13 – Coeficiente de difusão com uma variação da razão água/cimento (22)	21
Figura 2.14 – Limites críticos de cloretos (2)	22
Figura 2.15 – Relação entre a espessura do recobrimento e o período de iniciação da corrosão (2)	24
Figura 2.16 – Corrosão uniforme numa varanda de aço junto ao mar	25
Figura 2.17 – Aceleração da corrosão das armaduras devido à fendilhação do betão	27
Figura 2.18 – Exposição das armaduras devido à delaminação do betão	28
Figura 2.19 – Desagregação e erosão do betão	29
Figura 2.20 – Exemplo de uma má junta de betonagem (52)	30
Figura 2.21 – Acumulação de água devido a deformações na laje (53)	31

Figura 4.1 – Resultado de uma deficiente cofragem.....	52
Figura 4.2 – Posicionamento do elemento estrutural no ambiente	52
Figura 4.3 – Esquematização de uma cofragem incorreta escorando a cofragem do elemento de betão pelo interior.....	52
Figura 4.4 – Mau posicionamento das armaduras	53
Figura 4.5 – Esquematização do mau posicionamento das armaduras.....	53
Figura 4.6 – Elemento de betão pré fabricado destruído.....	54
Figura 4.7 – Esquematização e posicionamento dos elementos de betão.....	55
Figura 4.8 – Degradação acelerada de uma peça de betão armado.....	55
Figura 4.9 – Degradação acelerada de uma peça de betão armado.....	56
Figura 4.10 – Armaduras de uma peça de betão armado em degradação acelerada.....	57
Figura 4.11 – Esquematização das formas de degradação do recobrimento	57
Figura 4.12 – Suporte de fixação de uma varanda junto ao mar	58
Figura 4.13 – Soldadura da varanda aos varões existentes no betão armado pelo exterior do mesmo	59
Figura 4.14 – Esquematização dos sistemas de fixação das varandas aborçados	59
Figura 4.15 – Muro de suporte de um talude.....	60
Figura 4.16 – Muro de suporte de um talude.....	61
Figura 4.17 – Esquematização do muro de suporte de um talude	62
Figura 4.18 – Recobrimento de um muro.....	62
Figura 4.19 – Fendilhação do recobrimento em todo o muro.....	63
Figura 4.20 – Corte esquemático do recobrimento existente no muro após corrosão das armaduras	64
Figura 4.21 – Betonagem em cima de parede	64
Figura 4.22 – Esquema em corte da Figura 4.21	65
Figura 4.23 – Fendilhação numa varanda devido à corrosão.....	65
Figura 4.24 – Esquema em corte da varanda degradada devido à corrosão das armaduras.....	66
Figura 4.25 – Desvio de uma fenda num corrimão.....	67

Figura 4.26 – Esquema aproximado do corte da varanda com o desvio da fendilhação	67
Figura 4.27 – Fendilhação do suporte do corrimão e da base dos balaústres.....	68
Figura 4.28 – Esquema em corte da fendilhação do suporte dos corrimões	68
Figura 4.29 – Fendilhação e destacamento do betão em balaústres	69
Figura 4.30 – Esquema em corte da fendilhação de um balaústre	69
Figura 4.31 – Reparação de betão armado mal efetuada	70
Figura 4.32 – Esquema do betão novo sobre o antigo com as armaduras corroídas	71
Figura 4.33 – Orientação principal da degradação.....	71
Figura 4.34 – Dimensão de alguns agregados superiores ao recomendável.....	72
Figura 4.35 – Estado avançado de degradação do elemento de betão armado.....	73
Figura 4.36 – Heterogeneidade do betão no elemento estrutural	73
Figura 4.37 – Edifício em degradação	74
Figura 4.38 – Churrasqueira familiar fendilhada.....	75
Figura 4.39 – Fendilhação ao pormenor na churrasqueira.....	76
Figura 4.40 – Má colocação das armaduras numa laje junto ao mar	77
Figura 4.41 – Esquemática da colocação das armaduras apresentado na Figura 4.40.....	77
Figura 4.42 – Má colocação das armaduras numa laje junto ao mar	78
Figura 4.43 – Corrosão das armaduras numa zona tracionada de um tabuleiro numa ponte	79
Figura 4.44 – Esquemática do recobrimento e frentes de ataque do	79
Figura 4.45 – Parte exterior de uma ponte sobre o mar	80
Figura 4.46 – Parte interior de uma ponte sobre o mar	80
Figura 4.47 – Corte da ponte das figuras anteriores com as armaduras em análise.....	81
Figura 4.48 – Ponte rodoviária junto ao Aeroporto da Madeira	82
Figura 4.49 – Degradação dos pilhars e da laje de suporte do aterro.....	82
Figura 4.50 – Degradação dos pilhars	83
Figura 4.51 – Degradação dos pilhars	83
Figura 4.52 – Degradação dos pilhars	84

Figura 4.53 – Degradação dos pilhars	84
Figura 4.54 – Degradação dos pilhars	85
Figura 4.55 – Alçado da estrutura	85
Figura 4.56 – Corte transversal da estrutura	86
Figura 4.57 – Forças aplicadas à ponte	86

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Características das águas para amassadura de betões (4).....	8
Quadro 2.2 – Resistência à tração dos betões mais utilizados.....	9
Quadro 3.1 - Classes de exposição da NP EN 206-1 2007	34
Quadro 3.2 - Valores limite das classes de exposição para ataque químico proveniente de solos naturais e de águas neles contidas da NP EN 206-1 2007	35
Quadro 3.3 - Máximo teor de cloretos do betão da NP EN 206-1 2007	36
Quadro 3.4 - Valores limite para a composição e para as propriedades do betão da NP EN 206-1 2007.....	37
Quadro 3.5 – Outros exemplos onde ocorrem as classes de exposição, inseridos pela especificação LNEC E 464 – 2007 à NP EN 206-1 2007	38
Quadro 3.6 - Limites da composição e da classe de resistência do betão sob ação do dióxido de carbono, para uma vida útil de 50 anos da especificação LNEC E 464 – 2007.....	40
Quadro 3.7 - Limites da composição e da classe de resistência do betão sob ação dos cloretos, para uma vida útil de 50 anos da especificação LNEC E 464 – 2007	41
Quadro 3.8 - Limites da composição e da classe de resistência do betão sob ação do gelo/degelo, para uma vida útil de 50 anos da especificação LNEC E 464 – 2007	41
Quadro 3.9 - Limites da composição e da classe de resistência à compressão do betão sob ataque químico, para uma vida útil de 50 anos da especificação LNEC E 464 – 2007.....	41
Quadro 3.10 - Combinações de classes de exposição da especificação LNEC E 464 – 2007.....	42
Quadro 3.11 - Recobrimentos mínimos (mm) $c_{min,dur}$ no betão armado na E 464 – 2007	43
Quadro 3.12 - Recobrimentos mínimos (mm) $c_{min,dur}$ no betão pré-esforçado na E 464 – 2007....	43
Quadro 3.13 - Valores recomendados de w_{max} (mm).....	46
Quadro 3.14 - Estados limite de fendilhação do REBAP.....	48
Quadro 3.15 - Recobrimentos mínimos no REBAP	48
Quadro 4.1 – Forças aplicadas	87

LISTA DE ACRÓNIMOS E SIMBOLOGIA

Acrónimos

EN	Europäische Norm (Norma Europeia)
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
NP	Norma Portuguesa
REBAP	Regulamento de estruturas de betão armado e pré-esforçado

Simbologia

Letras minúsculas

$\Delta_{c,dur,y}$	Margem de Segurança
σ_s	Valor absoluto da tensão máxima admissível na armadura imediatamente depois da formação da fenda
A_{ct}	Área de betão tracionado
$A_{s,min}$	Área mínima das armaduras para betão armado na zona tracionada
$c_{dur,add}$	Redução do recobrimento mínimo no caso de proteção adicional
$c_{dur,st}$	Redução do recobrimento mínimo no caso de utilização de aço inoxidável
c_{min}	Recobrimento mínimo
$c_{min,b}$	Recobrimento mínimo para os requisitos de aderência
$c_{min,dur}$	Recobrimento mínimo relativo às condições ambientais
$f_{ct,eff}$	Valor médio da resistência do betão à tração à data em que se prevê que se possam formar as primeiras fendas

- k Coeficiente que considera o efeito das tensões não uniformes autoequilibradas, de que resulta uma redução dos esforços de coação
- k_c Coeficiente que tem em conta a distribuição de tensões na seção, imediatamente antes da fendilhação e da variação do braço do binário

Letras maiúsculas

- C Concrete (betão normal)
- HC Heavy concrete (betão pesado)
- KN Kilo Newton
- LC Light Concrete (Betão leve)
- MPa Mega Pascal

TERMOS E DEFINIÇÕES

De modo a facilitar e clarificar a leitura desta dissertação, apresentam-se de seguida alguns termos e definições utilizados na bibliografia.

Cloretos à superfície	Cloretos ligados à superfície dos poros do betão
Cloretos ligados a C_3A	Cloretos ligados ao sal de Fridel existente no betão
Cloretos livres	Cloretos existentes nos poros do betão
Cloretos Totais	Cloretos existentes no betão
Coefficiente de difusão	Coefficiente que representa a facilidade com que um soluto se move num solvente
Endurecimento	É um fenómeno que consiste em tornar rígido aumentando a resistência mecânica, resultado da presa
Presa	É um processo correspondente à passagem do estado pastoso (no caso do cimento) ao estado sólido

AGRADECIMENTOS

O conhecimento não tem limites e é facilmente adquirido quando temos certas pessoas que nos apoiam e estão sempre presentes para nos erguer.

Assim e só assim esta etapa tornou-se possível!

Agradeço profundamente aos que me ajudarão a conquistar mais uma vitória.

Ao meu orientador Dr.º Lino Maia, pela oportunidade que me facultou, coordenando-me, incentivando-me e partilhando os seus conhecimentos com a maior excelência.

A minha esposa Carina Gois, que me fornece força para continuar.

Aos meus pais Sérgio Alves e Helena Alves e irmã Melissa Alves, que me mostraram e mostram o caminho a percorrer.

A todas as outras pessoas que contribuíram diretamente e indiretamente.

Funchal, fevereiro 2016

Sérgio Alves

1

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1. INTRODUÇÃO

Esta dissertação tem um foco acentuado nos elementos de betão armado, tendo em conta que nesta insere-se particularmente a deterioração do betão causada pela corrosão das armaduras. O tema ganha um determinado interesse devido á quantidade de deteriorações existentes nos diversos ambientes e em diferentes tipos de elementos de betão armado estruturais como nos não estruturais. O betão armado é um dos principais materiais de construção em todo o mundo mas não tem o mesmo índice de utilização em todos os países, sendo mais utilizado nuns países do que noutros, devido á diferente relação utilidade/custo, em comparação com diferentes materiais existentes no mercado local. Como todos os materiais existentes, o betão armado está sujeito ao desgaste e às alterações químicas e físicas de acordo com a sua utilização e exposição. Apesar de existirem medidas regulamentares que permitem melhorar a durabilidade do material de modo a impedir tais anomalias, a corrosão das armaduras existentes no betão armado é muitas vezes prematura e difícil de controlar. Esta prematuridade compromete o comportamento estrutural da estrutura porque corrói as armaduras resultando numa diminuindo da secção das mesmas. Uma diminuição das armaduras corresponde a uma diminuição doas esforços resistentes podendo comprometer os elementos de betão armado e conduzir ao colapso do mesmo. À medida que a corrosão aumenta, as forças de tração devido à expansão das armaduras também aumentam e acabam por causar a fendilação e a delaminação do betão. Esta alteração no betão reduz a secção do elemento estrutural assim como os esforços resistentes na zona de compressão.

Na corrosão prematura das armaduras poderão estar envolvidos diversos fatores, como por exemplo uma má pormenorização, um mau controlo de qualidade, a inserção de erros no projeto, a falta de manutenção, uma má execução, a presença de um excesso de agentes agressores no meio ambiente face

ao previsto ente outros fatores. Todos os fatores apresentados têm como consequência a carbonatação ou o ataque de cloretos ou ambos em simultâneo. A corrosão do aço é uma das causas mais dominantes na degradação prematura do betão armado (Figura 1.1) (1).

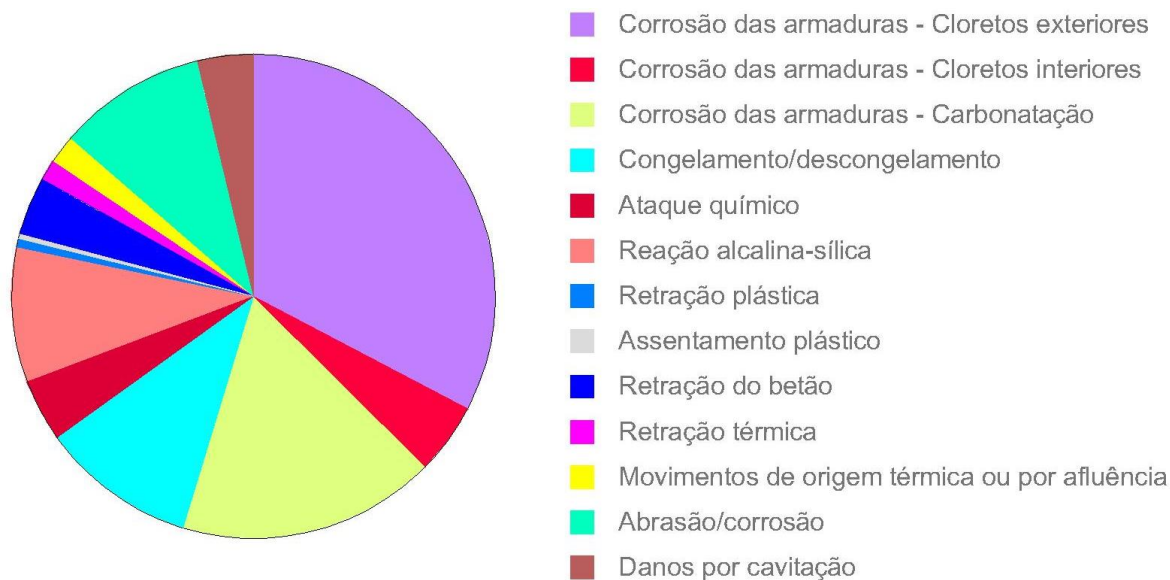


Figura 1.1 – Relevância das causas de deterioração do betão (2)

Em muitos dos casos as armaduras existentes nos elementos de betão armado não são estruturais e desta forma não são exigíveis no seu dimensionamento estrutural. Pelo fato dessas armaduras existirem, irão deteriorar o betão envolvente devido à corrosão. O mesmo ocorre com algumas armaduras mínimas como no caso de lajes.

Com este trabalho pretende-se analisar diversos casos de elementos de betão armado onde a corrosão afeta as armaduras não estruturais e mínimas, e analisar também a possibilidade de estas serem dispensadas uma vez que é provável que não sejam necessárias, onde se evitará assim a degradação dos elementos de betão armado ou de betão quando seja possível a dispensa da armadura.

1.2. OBJETIVOS

Esta dissertação tem como principal objetivo avaliar elementos e estruturas de betão armado no que concerne à possível dispensa das armaduras, devido á deterioração do betão causada pela corrosão das mesmas. É correntemente observável a existência de estruturas de betão armado em que a armadura é visível, está corroída e contribui para uma má estética do betão envolvente, mas não compromete a eficiência estrutural. A colocação de tais armaduras podem ser consequência de vários fatores, desde uma má interpretação de cálculos efetuados a uma má interpretação em obra, entre outros. Este tipo de

armaduras pode-se considerar não estruturais, desta forma não são necessárias e podiam ter sido dispensadas. Com esta dissertação pretende-se ainda:

- Efetuar um levantamento de situações em que foram utilizadas armaduras construtivas em elementos de betão que não precisavam de armaduras estruturais e cuja corrosão das armaduras conduziu a deterioração do elemento;
- Enquadrar os objetos em estudos na legislação sobre a necessidade da introdução de armaduras não estruturais / armaduras mínimas / armaduras construtivas nos elementos de betão;
- Elaborar análises estruturais quanto à necessidade de colocação de armaduras nos diversos casos.

1.3. CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS E LIMITAÇÕES

Os casos práticos que constam nesta dissertação foram analisados sem acesso ao seu projeto de fabrico/execução, ou seja, foram analisados com base apenas na inspeção visual.

Trata-se de uma observação de projeção onde esta é elaborada tendo em conta a regulamentação, com a exceção do caso de armaduras em zonas do betão comprimidas nas vigas, ou no caso da utilização de armaduras mínimas quando o cálculo de tais armaduras resulta num valor inferior às mínimas, aumentando o volume da corrosão resultante. Seria interessante elaborar um estudo ao pormenor das referidas armaduras, quais as suas vantagens e desvantagens assim como a necessidade de coloca-las.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Na elaboração desta dissertação utilizou-se cinco capítulos na sua estruturação, sendo o primeiro as considerações iniciais onde consta uma breve apresentação do tema, assim como os seus objetivos e uma sintetização estrutural de condução da dissertação.

O segundo capítulo dedica-se inteiramente ao estado de arte da dissertação, nele inclui-se todos os aspetos e conhecimentos necessários ao desenvolvimento deste trabalho, nomeadamente composição e comportamento dos materiais de construção envolvidos, assim como uma descrição detalhada dos processos de corrosão das armaduras e seus influentes.

O terceiro capítulo é dedicado à legislação existente, no que concerne às exigências regulamentares afetas à durabilidade das estruturas, fazendo especial referência aos métodos, limites e requisitos de projeção estrutural.

No quarto capítulo apresentam-se casos de estudo onde a corrosão de armaduras não estruturais é pertinente em elementos de betão armado, apresentam-se também análises estruturais quanto à existência de tais armaduras.

O quinto e último capítulo denominado de considerações finais apresenta as notas finais, as principais conclusões obtidas e perspectivas futuras de pesquisa e desenvolvimento para investigações posteriores relacionadas com o tema.

2

ESTADO DA ARTE

2.1. COMPOSIÇÃO E COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DO BETÃO

O betão é um material resultante da mistura de vários constituintes, podendo estes serem separados em 2 grupos. Um grupo os componentes básicos: o cimento, agregados de várias dimensões, água, e outro grupo as adições e adjuvantes (3). Este material pode ser utilizado na execução de estruturas apenas por si só ou na conjugação de armaduras, denominado de betão simples, betão armado e betão pré-esforçado. O betão passa por 2 fases, a primeira fase denomina-se betão fresco e consiste na adição de todos os seus componentes assim como a sua amassadura e depósito em formas, a segunda fase trata-se do processo de endurecimento através de reações químicas de hidratação entre os grãos de cimento e a água, adquirindo uma certa resistência. Esta resistência tem início em poucas horas após o fabrico do betão e atinge entre 60 a 90 % do endurecimento total após 28 dias, dependendo do tipo de cimento e cura utilizados (4).

O betão após endurecer pode ser classificado como betão leve (LC), betão normal (C) e betão pesado (HC) dependendo da sua massa volúmica, menor ou igual a 2000 kg/m^3 , maior que 2000 kg/m^3 até 2600 kg/m^3 e superior a 2600 kg/m^3 , respetivamente (4). A classificação refere ainda a classe de resistência do betão, temos o exemplo do betão C30/37 que corresponde a um betão normal com uma resistência à compressão aos 28 dias de pelo menos 30 MPa medido em cilindros e 37 MPa medido em cubos (5) (Figura 2.1). No REBAP a classe de resistência tem uma designação diferente sendo o exemplo anterior equivalente a B37.

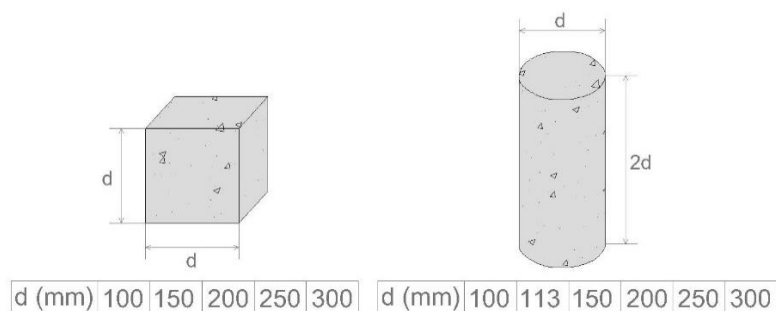


Figura 2.1 – Dimensões dos cubos e cilindros para teste de resistência segundo NP EN 12390-3

O betão é classificado em diferentes classes de exposição de acordo com o meio ambiente, estas classes de exposição são regulamentares e estão explícitas no Capítulo 3.

2.1.1. CONSTITUINTES DO BETÃO

O betão contém vários constituintes tendo por base o cimento, a água e os agregados, mas podem ser adicionados outros mais de acordo com as necessidades em obra como requisitos de durabilidade, resistência e proteção das armaduras.

2.1.1.1. CIMENTO

O cimento é um material inorgânico, ou seja é um ligante hidrófilo hidráulico, que ganha presa, endurece e pode aglomerar outros materiais, ao misturar com a água forma uma pasta que endurece ao ar ou num ambiente saturado de água (4) (3).

O cimento Portland, obtém-se através da mistura de calcário (CaCO_3) com argilas, que através da sua cozedura à temperatura de 1450°C forma pequenos aglomerados denominados de clínquer (4). Esse clínquer é moído após o seu arrefecimento juntamente com gesso para regular o tempo de presa e adjuvantes para facilitar a moagem, o seu custo torna-se elevado devido aos gastos elevados de energia (6). A ele é adicionado outras adições como pozolanas, cinzas volantes, escórias de alto-forno entre outras para modificar as suas propriedades de acordo com o pretendido. Os seus componentes minerais principais são silicato tricálcico, silicato bicálcico, aluminato tricálcico e alumino ferrato tetra cálcico (7). Os cimentos são definidos na Norma NP EN 197-1 e podem ser utilizados no betão simples, armado ou pré-esforçado (4).

2.1.1.2. AGREGADOS

Os agregados ocupam geralmente entre 70 a 80 % do volume do betão sendo desta forma um constituinte importante (6). A sua composição é principalmente proveniente de rochas, podendo ser partículas ou areias, existe ainda agregados artificiais ou partículas recicladas que podem também, ser utilizadas como aglomerados. Os agregados tem dimensões entre 0,1 mm e 20 cm e afetam marcadamente o comportamento do betão (6), designam-se por areias os agregados com dimensões inferiores a 5 mm (areia rolada quando de origem natural e areia britada quando de origem artificial) e agregados grossos quando tenham dimensões superiores a 5 mm (pedregulhos quando com origem natural e brita quando de origem artificial) (4).

As propriedades mais importantes que devem ser consideradas na seleção dos agregados para constituição do betão podem ser de natureza física, química e geométrica, deve ter determinada forma e dimensões proporcionadas, boa resistência às forças que irão provocar tensões no betão (geralmente estão na ordem dos 60 MPa), adequadas propriedades térmicas, boas propriedades químicas que permitam boa aderência pelo ligante e resistência às tensões e não devem conter substâncias que prejudiquem o betão (4).

A quantidade dos agregados deve ser a maior possível, tendo em conta que as suas partículas são aglomeradas pela pasta de cimento, desta forma a sua dimensão deve ser a máxima possível desde que compatível com as condições e exigências em obra (6). É também de salientar que as dimensões dos agregados devem ser variadas de forma a obter um bom preenchimento dos possíveis vazios existentes no betão, onde a sua granulometria irá condicionar a compacidade do betão. Quanto maior for a máxima dimensão do agregado menor será a quantidade de cimento e água necessária, contudo o tamanho do agregado irá ser condicionado pelo afastamento das armaduras (8). Uma granulometria mais compacta resulta num betão com mais facilidade em se desagregar mas em contrapartida tem uma resistência mais elevada devido à baixa porosidade, pouca retração e grande durabilidade (4).

Os agregados são definidos nas normas NP EN 12620 e NP EN 13055-1.

2.1.1.3. ÁGUA DE AMASSADURA

A água de amassadura é um componente essencial no fabrico do betão, confere uma boa trabalhabilidade ao betão e permite uma boa compactação (9). A quantidade de água a utilizar no betão deve ser controlada, quando em excesso cria-se uma rede de poros que após a secagem que prejudica a resistência do betão, desta forma deverá ser a mínima quantidade possível que garanta uma adequada trabalhabilidade (4). A água deverá ainda respeitar outros parâmetros estipulados no Quadro 2.1 de

forma a não comprometer as características físicas e químicas do betão, nem contribuir posteriormente para a degradação da estrutura.

Quadro 2.1 - Características das águas para amassadura de betões (4)

Caraterística	Legislação	Valor a satisfazer	
		Betão simples	Betão armado e pré-esforçado
pH	NP 411	≥ 4	≥ 4
Resíduo dissolvido (g/dm ³)	E 380	≤ 35	≤ 10
Resíduo em suspensão (g/dm ³)	E 380	≤ 5	≤ 2
Consumo Químico de Oxigénio (mg/dm ³)	NP 1414	≤ 500	≤ 500
Teor de cloretos (mg/dm ³)	NP 423	≤ 4500	≤ 600
Teor de sulfatos (mg/dm ³)	NP 413	≤ 2000	≤ 2000
Teor de ortofosfatos (mg/dm ³)	E379	≤ 100	≤ 100
Teor de nitratos (mg/dm ³)	E382	≤ 500	≤ 500
Teor de sulfuretos (mg/dm ³)	NP 1417	≤ 100	≤ 100
Teor de sódio e de potássio (mg/dm ³)	E 381	≤ 1000	≤ 1000

2.1.1.4. ADIÇÕES

As adições são materiais inorgânicos que se adiciona ao betão para melhorar determinadas propriedades como por exemplo a durabilidade e resistência do betão, podem ser de origem natural ou origem em subprodutos industriais (10). As adições podem ser classificadas em dois tipos, sendo do tipo I as adições quase inertes como o filer calcário e do tipo II as adições com propriedades hidráulicas latentes como a escória granulada de alto-forno, as cinzas volantes e a sílica de fumo. A utilização de adições do tipo II confere ao betão menor resistência inicial mas a longo prazo resulta em melhores propriedades mecânicas, maior resistência ao ataque químico maior resistência ao ataque químico e menor teor em hidróxido de cálcio (4).

2.1.1.5. ADJUVANTES

Os adjuvantes são produtos adicionados em pouca quantidade antes ou na fase de amassadura, normalmente inferior a 5% da massa de cimento, com a finalidade de modificar as propriedades do betão sendo a mais importante a trabalhabilidade do mesmo. Como foi referido anteriormente deve-se adicionar a menor quantidade de água de amassadura possível sendo o adjuvante uma boa solução para tal, porque não alterará a trabalhabilidade devido à redução da água (11). Além da trabalhabilidade os adjuvantes podem retardar e/ou acelerar a presa, acelerar o endurecimento do betão, aumentar a resistência aos ciclos gelo/desgelo, diminuir a permeabilidade, ajudar a bombagem e inibir a corrosão das armaduras (4).

2.1.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO BETÃO

A principal funcionalidade do betão é resistir à compressão uma vez que este material tem uma capacidade de compressão muito superior à tração, assim sendo este material é colocado estrategicamente com a funcionalidade resistente em locais onde exista compressão (4). Contudo é também utilizado em zonas tracionadas para cobrir as armaduras e consequentemente transferir os esforços às fundações, poderá também ser utilizado para conferir rigidez à estrutura.

2.1.2.1. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Como foi referido anteriormente a sua resistência dependerá dos seus constituintes e o seu ensaio é feito através de cubos e cilindros de cimento, obtendo estes últimos uma resistência cerca de 20% inferior do ensaio cúbico, devido à maior esbelteza do objeto (4). Devido à heterogeneidade do material deve-se ter em conta uma dispersão dos valores obtidos em ensaios, desta forma devido a essa variação a resistência característica do betão tem em conta a probabilidade de 95% de ser excedida.

2.1.2.2. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

A resistência à tração do betão tem um papel importante na fendilhação do mesmo e na aderência às armaduras, mas os valores da resistência à tração são muito inferiores à compressão (cerca de 10%) (4). É de referir que a mesma peça de betão pode estar sujeita a forças de compressão, tração e torção em simultâneo, sendo que nesta situação este deve ser reforçado com armaduras no âmbito de garantir uma resistência de acordo com as solicitações (5). Seguidamente apresentam-se a resistência à tração característica para os betões mais utilizados no **Quadro 2.2**.

Quadro 2.2 – Resistência à tração dos betões mais utilizados

Designação	f_{ctm} (MPa)
C15/20	1,9
C20/25	2,2
C25/30	2,6
C30/37	2,9
C35/45	3,2
C40/50	3,5

2.2. COMPOSIÇÃO E COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DO AÇO

O aço pode apresentar-se numa estrutura de construção em diversas formas, mas no sentido desta dissertação apenas torna-se relevante referir o seu aparecimento como armaduras ordinárias e armaduras de pré-esforço no betão armado. Quanto às armaduras ordinárias estas apresentam-se nervuradas de forma a possuir aderência com o betão e lisas (estas últimas muito incomum) enquanto as armaduras de pré-esforço podem ter aderência ou não, podendo ser aplicadas antes da betonagem ou após o endurecimento através de bainhas deixadas no interior do betão (12).

2.2.1. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

As armaduras (aço) têm como principais constituintes o ferro e o carbono, possuem também algumas impurezas como manganês, silício, cromo, níquel, cobre e alumínio onde estas podem ser controladas de forma a obter as propriedades desejadas. A percentagem de carbono utilizada separa os tipos de aço denominados de aços macios e aços duros, os aços duros têm uma percentagem de carbono mais elevada até 2 %. Quanto maior for a quantidade de carbono maior será a resistência à rotura, maior o limite de elasticidade do material e menor o limite de elasticidade (Figura 2.2) (13).

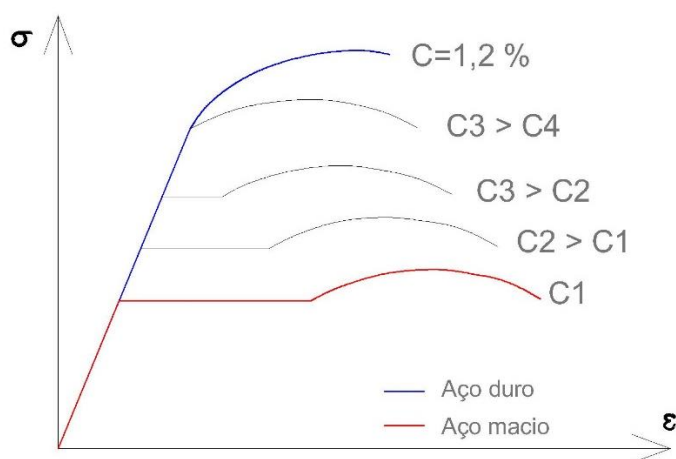


Figura 2.2 – Consequência da variação da quantidade de carbono presente nas armaduras

Enquanto os aços macios têm uma resistência entre os cerca de 200 a 600 MPa, os aços duros atingem valores entre os 1600 a 1800 MPa, já a elasticidade varia entre os 20 a 30 % nos primeiros tornando-os dúcteis e 4 a 8% nos segundos tornando-os frágeis.

2.2.2. COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

As armaduras apesar de terem um bom comportamento à tração e à compressão (no caso das ordinárias), estas são utilizadas no betão armado essencialmente em situações à tração, para transferir esforços no caso dos estribos da viga e para impedir a flexão de outras armaduras no caso dos estribos dos pilhars. Algumas armaduras são utilizadas apenas por razões construtivas como é o caso das armaduras utilizadas a meio vão de uma viga na parte onde a compressão está instalada (12). No caso das armaduras ordinárias estas colocam-se o mais afastadas da linha neutra do elemento para garantir uma maior resistência criando um maior momento resistente, como consequência estas localizam-se muito próximas do ambiente exterior onde apenas têm como proteção o recobrimento em betão. Estas armaduras apresentam-se disponíveis no mercado com diâmetros comuns de 6, 8, 10, 12, 16, 20, 25 e 32 mm e uma tenção de cedência de 235, 400 e 500 MPa (14).

2.3. PATOLOGIAS NO AÇO

Os problemas que poderão surgir no aço, além da sua deformação e rotura, são provocadas pela incapacidade de proteção do betão envolvente aos agentes agressores sendo os principais problemas a carbonatação e o ataque de cloretos (15).

2.3.1. CARBONATAÇÃO

O betão armado é considerado um elemento de elevada durabilidade devido à proteção química que o betão confere às armaduras nele embebidas (3) (16). A carbonatação ocorre no betão porque o hidróxido de cálcio reagem o dióxido de carbono que provem do ar ou da água para forma carbonato de cálcio, esta carbonatação melhora a resistência do betão, mas é desvantajoso no caso do betão armado porque diminui o pH, conduzindo à corrosão das armaduras (17). No interior do betão armado as armaduras encontram-se protegidas devido à elevada alcalinidade do meio (18). O betão que envolve as armaduras, possui um pH elevado entre 12 e 14 devido à presença elevada de hidróxido de cálcio e quantidades inferiores de hidróxido de sódio e potássio, compostos resultantes da hidratação dos silicatos de cálcio do cimentos e dos álcalis do clínquer (2). Devido a este ambiente alcalino ocorre a passivação das armaduras através da formação de uma película passiva na superfície da armadura (10 nanómetros de espessura), esta película constitui uma barreira de proteção que impede a corrosão (Figura 2.3) (19). Não se conhece a 100% a composição da referida película, mas considera-se que é à base de complexos de ferro e cálcio com iões OH^- e CO_3^{2-} , óxidos de ferro Fe_2O_3 e Fe_3O_4 e água molecular (2).

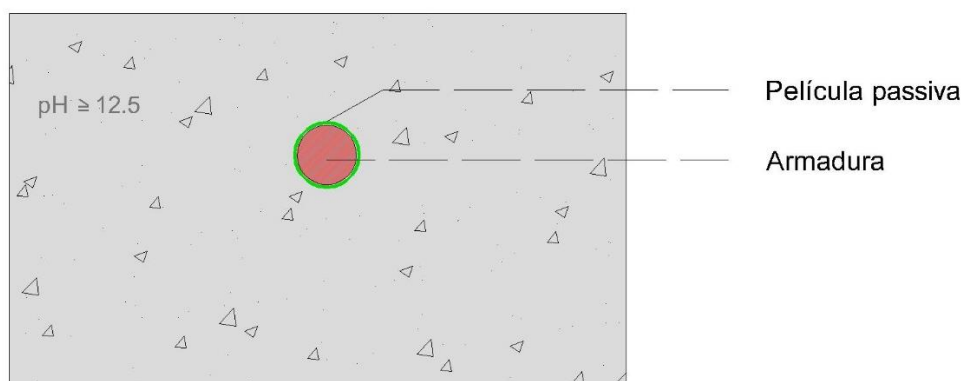


Figura 2.3 – Proteção das armaduras no betão

A penetração do dióxido carbónico através dos poros do betão armado, mais concretamente na zona do recobrimento (Figura 2.4), reage com o hidróxido de cálcio (carbonatação) e provoca uma diminuição da alcalinidade (20). Esta redução alcalina quando atinge valores de pH inferiores a cerca de 10 – 11, iniciar-se-á a despassivação das armaduras através da dissolução da película expansiva existente e originará o início do mecanismo da corrosão das armaduras quando na presença de O e H₂O (2).

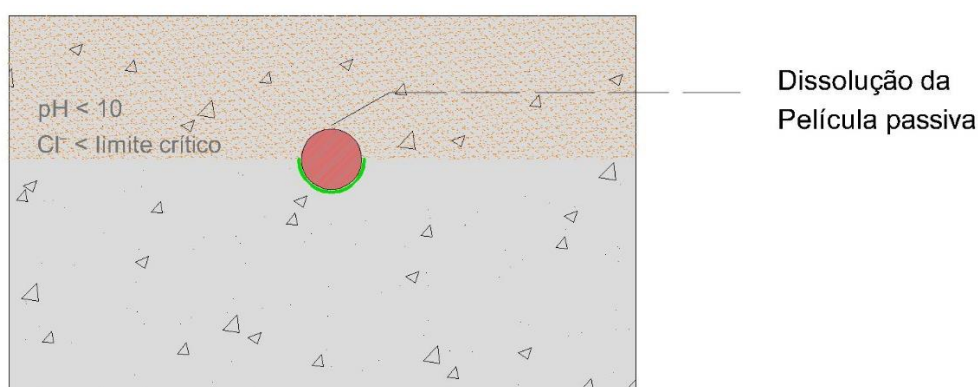


Figura 2.4 – Despassivação das armaduras no betão

A Figura 2.5 representa a profundidade da penetração no betão ao longo do tempo, esta não tem uma velocidade de penetração constante e é sempre decrescente desde o início da penetração. A maior velocidade é nos primeiros 10 anos e nos restantes continua a descer mas com uma menor desaceleração. No caso de elaborar uma eventual medição de profundidade de carbonatação, há que ter em conta que quanto mais antiga for a estrutura maior deve ser a sensibilidade da medição uma vez que a profundidade por ano diminui drasticamente (18).

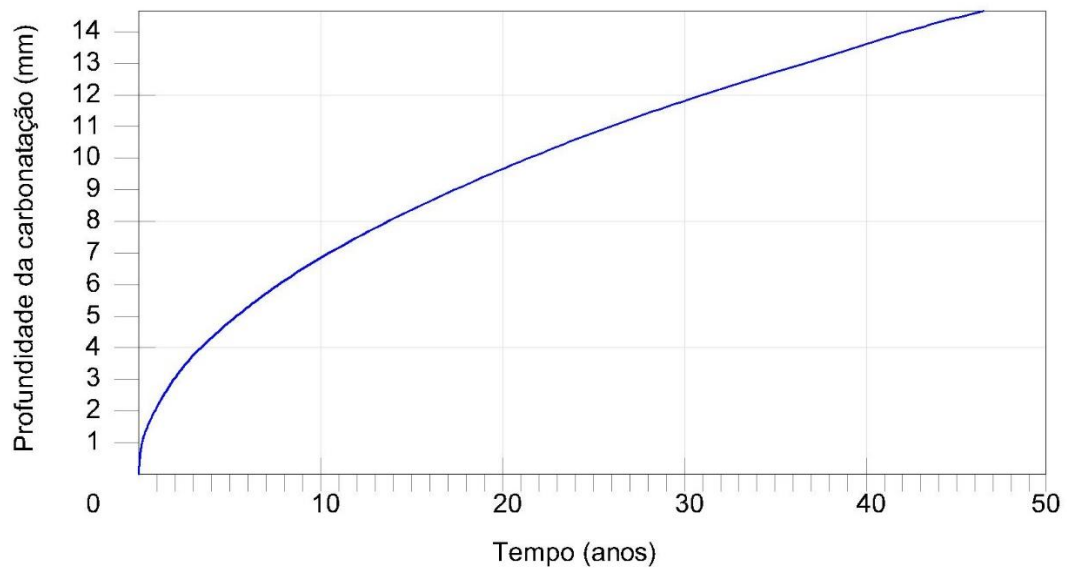
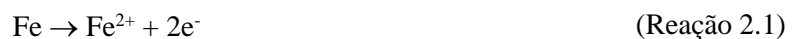


Figura 2.5 – Penetração do carbono no recobrimento em geral (18)

A resistência à carbonatação de um elemento de betão pode ser determinada de acordo com a especificação do LNEC E391 de 1993 (20).

2.3.1.1. MECANISMO DA CORROSÃO

O processo de corrosão das armaduras dá-se por um processo eletroquímico, envolvendo reações químicas e correntes elétricas e constitui-se por quatro componentes principais: ânodo, cátodo, condutor metálico e eletrólito (21). Na zona despassivada da armadura ocorre ânodos geralmente muito pequenos e próximos uns dos outros através da criação de micro células de corrosão, mantendo cátodos também muito pequenos em todo o resto da mesma armadura (22). Uma vez que a armadura é um bom condutor elétrico e o betão é considerado um eletrólito como um meio aquoso em que a corrente elétrica é transportada por iões, após ocorrer a dissolução do aço, permite que o ferro (Fe) perca 2 eletrões (Reação 2.1) (reação anódica) e estes sejam conduzidos para as zonas onde existam cátodos (2).



Os dois eletrões irão reagir com o oxigénio e a água existente à volta dos cátodos, resultará numa redução do oxigénio e produzirá duas moléculas de hidróxido por reação catódica (Reação 2.2) (23).



Estas duas moléculas de OH^- reagirão com o Fe^{2+} de (Reação 2.1) e produzirá hidróxido de ferro (Reação 2.3) o qual será o composto resultante da corrosão.



Além das reações mencionadas existirão reações anódicas secundárias (Reações 2.3) cujos produtos irão originar um elevado aumento do volume na zona do ânodo (Figura 2.6), podendo aumentar o tamanho em 6 vezes (24).

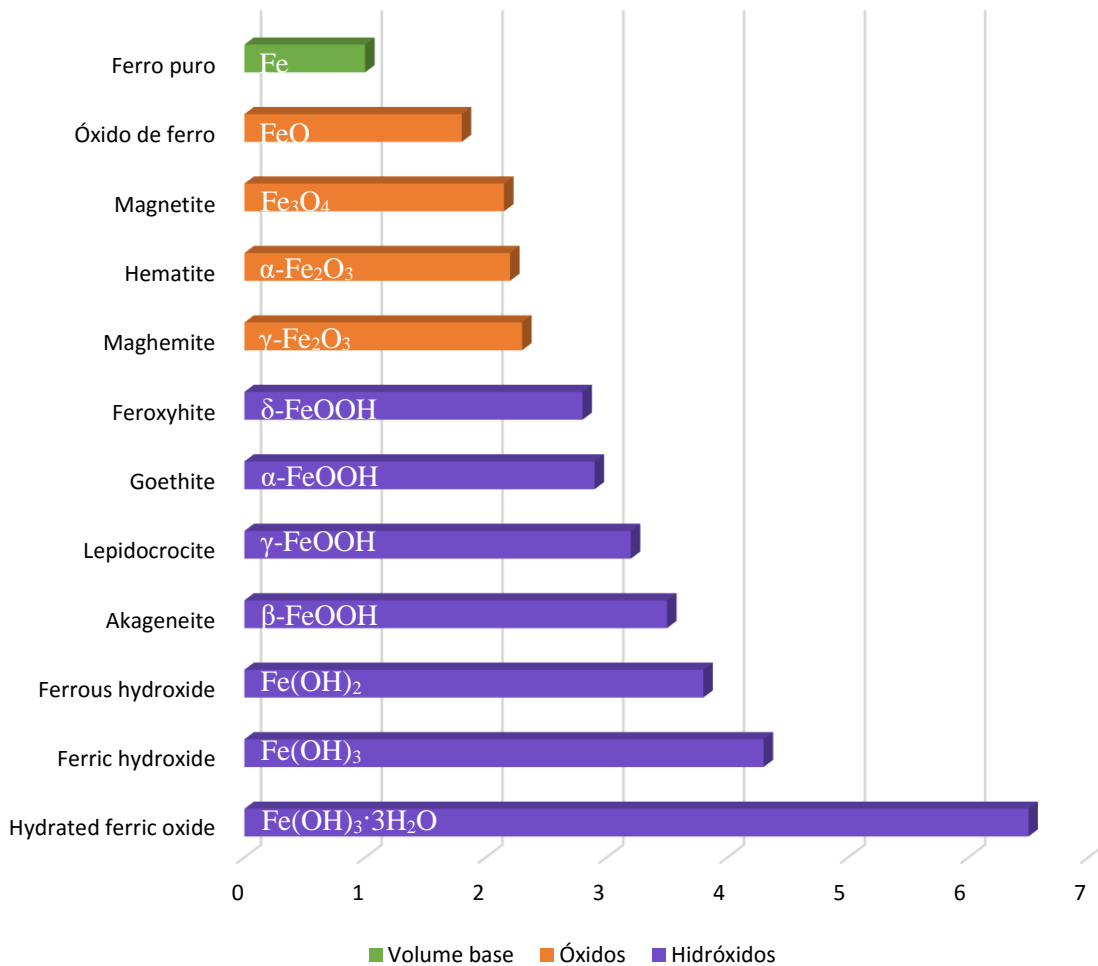
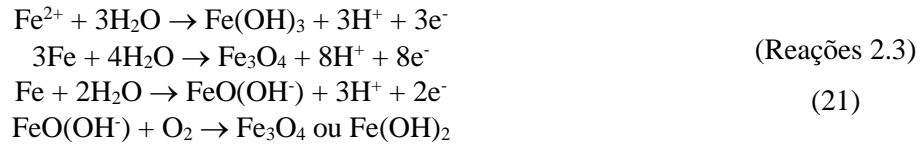


Figura 2.6 – Volume relativo dos produtos da corrosão (25)

Alguns dos produtos resultantes acumulam-se na pasta cimentícia, quando os poros e os vazios existentes no betão ficam preenchidos, ocorrem tensões devido à expansão das armaduras causando fendilhação e delaminação no betão (Figura 2.7) (2).

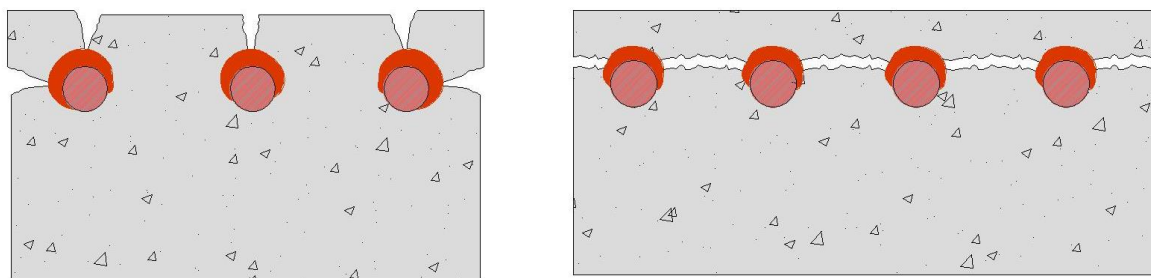


Figura 2.7 – Fendilhação à esquerda e delaminação à direita do betão

Quanto maior for a acessibilidade do oxigénio às armaduras e maior for a condutividade elétrica do betão, maior será a velocidade de corrosão (26). A corrosão só é possível se acontecerem todos os parâmetros abordados e existir diferenças de potencial na superfície das armaduras em simultâneo (27). É também de referir que num ambiente submerso não ocorrerá corrosão significativa devido à não disponibilidade de oxigénio, nem num betão localizado num ambiente muito seco também não ocorrerá a corrosão das armaduras devido à baixa condutividade, uma vez que não existirá eletrólito (21). A corrosão por ação da carbonatação é um processo de degradação lento e pode demorar dezenas de anos (21).

A taxa de corrosão das armaduras por ação da carbonatação varia entre os 20 a 50 $\mu\text{m}/\text{ano}$ (28).

2.3.1.2. TEOR DE HUMIDADE

O betão quando seco, apesar de ter uma boa acessibilidade ao oxigénio tem uma resistividade muito elevada e à medida que o teor de humidade aumenta, também aumenta a velocidade de corrosão (2). Até aos 40 % de teor de humidade o aumento da velocidade é relativamente baixo, mas após os 40% a velocidade sobe mais rápido com um incremento igual de teor de humidade face a menos de 40%. A velocidade máxima de corrosão é atingida quando o teor de humidade atinge os 70 % e volta a baixar até deixar de existir a corrosão, isto deve-se à fraca existência de oxigénio até à sua ausência devido à presença de água nos poros do betão (Figura 2.9), neste ultimo caso o oxigénio passa a ser o fator que controlará a velocidade da corrosão (29). A Figura 2.8 apenas apresenta risco de corrosão na imagem do centro.

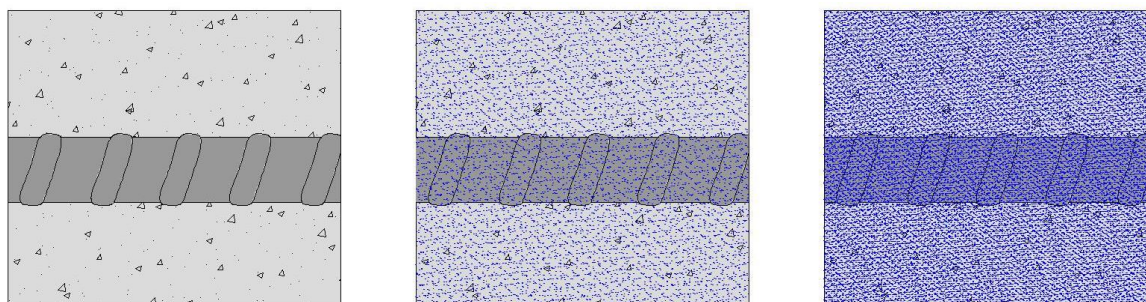


Figura 2.8 – Três casos distintos relativamente ao teor de humidade (da esquerda para a direita - ambiente seco; ambiente com elevado teor de humidade; ambiente saturado) (2)

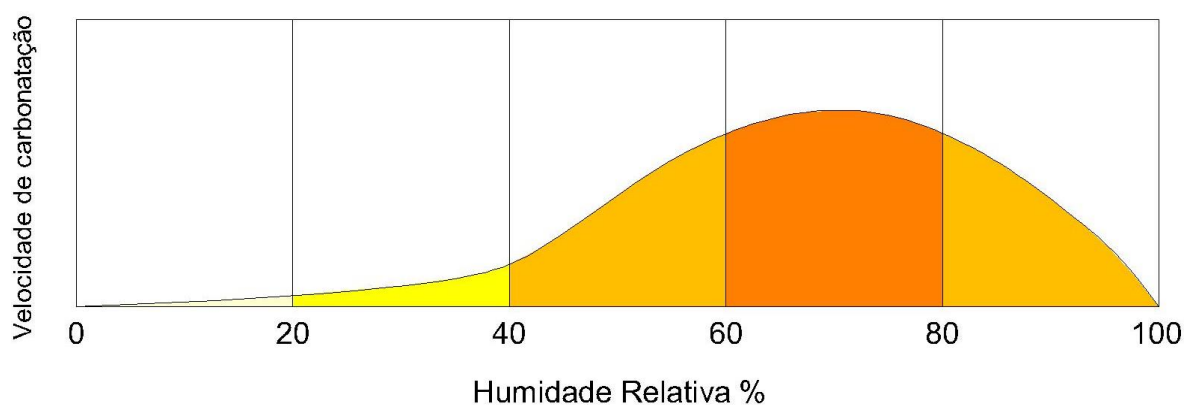


Figura 2.9 – Velocidade da carbonatação de acordo com o teor de humidade (2)

2.3.1.3. RAZÃO ÁGUA-CIMENTO E TEMPERATURA

A razão água-cimento assim como a quantidade de cimento serão os fatores que irão condicionar a porosidade de betão aumentando ou diminuindo-a. Desta forma uma maior razão água-cimento resulta numa maior permeabilidade com maior porosidade, o que torna-se favorável à corrosão pois existe mais espaço para os agentes agressores. Quanto ao cimento, se aumentamos a sua quantidade maior será a disponibilidade de Ca(OH)_2 o que resultará numa profundidade menor de carbonatação (Figura 2.10) (2), assim como a uma temperatura mais baixa (30). Já o período de cura contribuirá para uma menor profundidade de carbonatação quanto maior for.

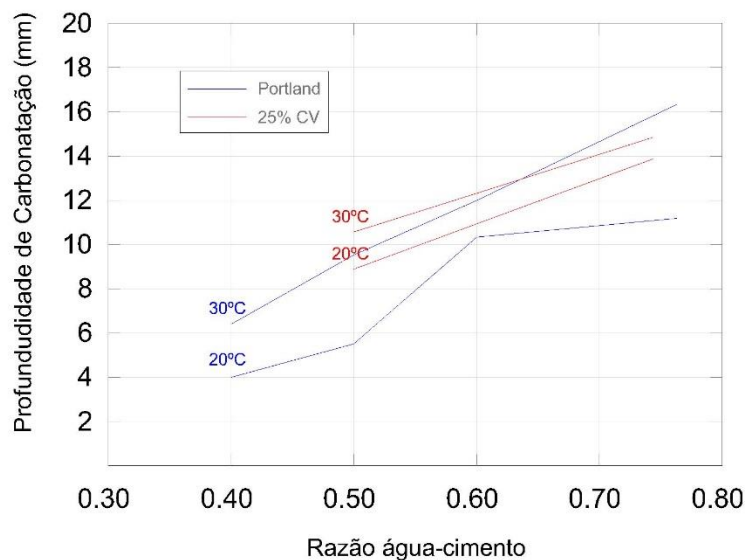


Figura 2.10 – Influência da razão água-cimento e temperatura na profundidade de carbonatação adaptado de (2)

2.3.1.4. TIPO DE CIMENTO

O tipo de cimento também será um fator importante na profundidade de penetração da carbonatação (31). As reservas alcalinas no betão que podem reagir com o dióxido de carbono são condicionadas pelo tipo de cimento, os cimentos com adições pozolânicas possuem menor quantidade de produtos alcalinos logo a velocidade de carbonatação será maior devido à baixa alcalinidade resultante do betão (32). Desta forma os cimentos Portland normais são os mais resistentes à penetração da carbonatação devido à sua alta alcalinidade (31). As adições dos cimentos podem reduzir a velocidade de penetração, estas reduzirão a porosidade do betão devido aos produtos resultantes bastantes finos, resultantes da combinação com Ca(OH)_2 formando silicato de cálcio hidratado, este silicato dificultará a difusibilidade de dióxido de carbono (33).

2.3.2. CLORETOS

O betão é inerentemente durável quando exposto aos cloretos (34), contudo o ataque de cloretos é considerado um dos mais importantes fatores que afetam a vida de serviço das estruturas de betão armado, a degradação dessas estruturas devido à penetração dos cloretos têm criado problemas sérios na engenharia civil durante muitos anos (35). O seu processo é rápido (alguns anos) e dá-se através de 2 etapas sendo a primeira denominada de iniciação, esta caracteriza-se pela diminuição da alcalinidade e pela penetração de cloretos até atingirem o limite crítico, esta etapa não gere perda de funcionalidade

da estrutura (22). A segunda etapa ocorre após a despassivação das armaduras, a partir da perda da proteção do aço começa o processo de corrosão e posteriormente a degradação do betão armado devido à corrosão das armaduras (36). Ao contrário da carbonatação formam-se macro células de corrosão por ação dos cloretos, sendo as zonas catódicas muito superiores às zonas anódicas podendo ser o seu grau de proximidade muito variável (22), esta desproporção das zonas catódicas face às anódicas tem como consequência um aceleração na corrosão das armaduras, dissolvendo o aço nas zonas anódicas devido às altas densidades de corrente nessas zonas. A corrosão geralmente é localizada ou por picados, mas pode também ser considerada no geral quando o nível de contaminação é muito elevado. A taxa de corrosão por ações dos cloretos variam entre os 50 a 100 $\mu\text{m}/\text{ano}$ em betões de boa qualidade e 100 a 500 $\mu\text{m}/\text{ano}$ em betões de baixa qualidade (28), muito superior à carbonatação.

2.3.2.1. PENETRAÇÃO DOS CLORETOS

Os cloretos penetram-se do exterior para o interior do betão através de vários mecanismos, nomeadamente permeação, absorção ou difusão (22). Estes mecanismos podem ocorrer em simultâneo ou isoladamente. A permeação consiste no transporte dos cloretos através de líquidos ou gases através da pressão exercida sobre o betão, como por exemplo em estruturas submersas onde a pressão torna-se elevado devido ao peso da água. A absorção ocorre apenas quando a estrutura encontra-se em ciclos de molhagem e secagem. Na fase de molhagem ocorre a penetração de cloretos por capilaridade e assim que ocorrer a secagem, apesar de a água se evaporar os cloretos mantêm-se no interior do betão e acumulam assim nas sucessivas molhagens e secagens, quantidades de cloretos superiores ao seu meio envolvente (ocorre principalmente em zona de rebentação das ondas e das marés). A difusão não corresponde à troca de líquidos entre o betão e o meio mas sim na criação de uma ponte entre líquidos, para isso o betão deve possuir líquidos e o seu meio envolvente também. Desta forma quanto maior for a porosidade do betão (macroporos) maior será o risco de ataque de cloretos, devido a existir mais espaço livre entre o betão para uma maior concentração dos referidos agentes (22).

Zhiwu Yu elaborou testes emergindo amostras de betão de classe C50 numa solução saturada de calcário com 5% de cloreto de sódio a 20° durante 28 dias e mediu a concentração dos cloretos no betão de acordo com a profundidade (35). Na Figura 2.11 indica que o conteúdo de cloretos diminui com o aumento da profundidade tal como a carbonatação, as respetivas curvas são um ajuste dos dados recolhidos os quais possuem uma margem de erro pouco significativa.

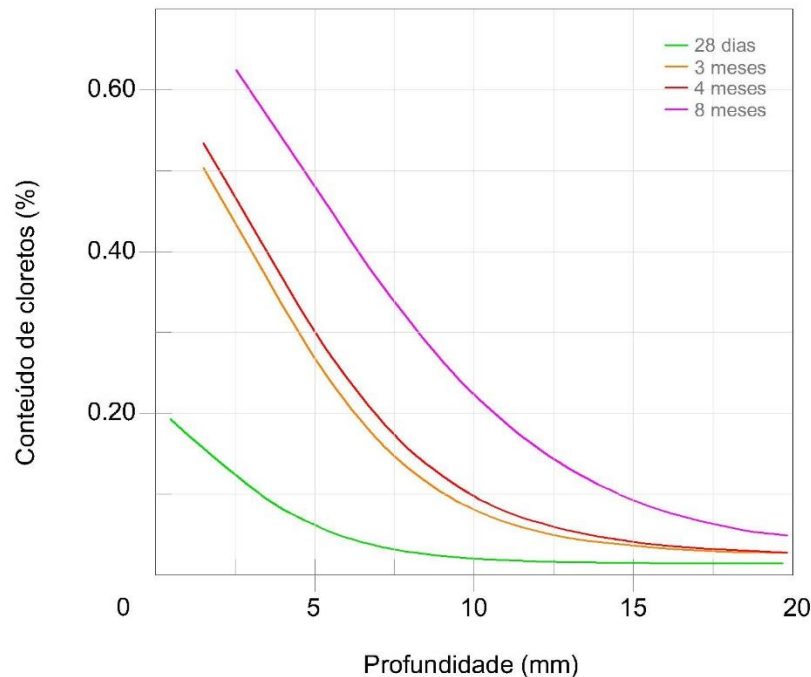


Figura 2.11 – Profundidade de penetração cloretos da experiência de Zhiwu Yu (35)

O conteúdo de cloretos e sua profundidade de penetração aumentam com o tempo, onde o valor máximo de cloretos é atingido primeiramente na superfície do betão. Quanto maior for a profundidade de penetração menor será a sua velocidade porque o salto da curva dos 28 dias para a curva dos 3 meses é muito superior da curva dos 3 meses à curva dos 4 meses, tal deve-se ao preenchimento dos vazios pelos cloretos dificultando a entrada dos mesmos (35), a velocidade neste caso é decrescente mas não uniforme. Observa-se também que o início da curva dos 28 meses é menos acentuada que as restantes curvas e à medida que a sua concavidade se situa mais profunda (com o aumento do tempo), a zona antes da concavidade tende a formar uma reta, tal indica que a velocidade de penetração até os 0,20 % de conteúdo de cloretos é superior, a aceleração de penetração é máxima em cerca de 0,016 % (teor existente já no betão muito antes da cura) e dá-se uma desaceleração até esta chegar a zero nos 0,20%, após tal acontecimento a velocidade é constante. O conteúdo de cloretos nunca é zero porque o mesmo já existe no betão no momento da sua conceção (37). Quanto maiores forem as forças de compressão no betão, maior será a concentração de cloretos na superfície do mesmo devido às suas características como por exemplo a microestrutura, a porosidade e a saturação inicial que influencia o gradiente de concentração dos cloretos (35).

Quanto às várias classes do betão, observa-se que quanto melhor a qualidade do betão mais difícil a penetração dos cloretos (35).

2.3.2.2. LIMITE CRÍTICO DE CLORETOS

No momento de amassadura do betão e pelo contato com um ambiente contaminado com cloretos, estes integram-se no betão sob 3 formas: dissolvem-se na solução do betão sob a forma de cloretos livres (agressivos), absorvem-se quimicamente ao aluminato tricálcico (C3A – sal de Friedel, não agressivos) e fisicamente na superfície dos poros (não agressivos) (**Figura 2.12**) (2).

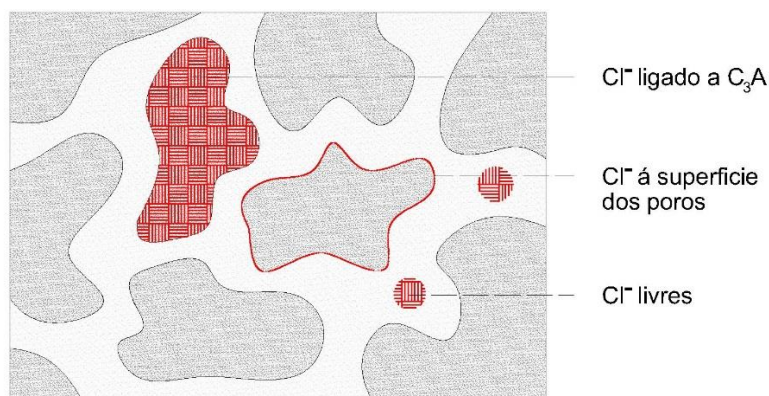


Figura 2.12 – Formas de aparecimento dos cloretos

Os cloretos livres são os principais intervenientes na corrosão das armaduras, desta forma à medida que estes se combinam quimicamente a C3A, resulta na redução da velocidade de penetração assim como na redução de cloretos livres (22). O fenómeno da corrosão desencadeia-se quando o teor de cloretos livre atinge um certo limite, o qual é de difícil compreensão pois existem vários fatores que o influenciam. O limite de teor de cloretos admissível é variável e depende da alcalinidade do meio, sendo o limite superior quanto mais elevada for a alcalinidade (38). Depende ainda de outros fatores já abordados na carbonatação como: o tipo de cimento; a compactação e cura; a razão água/cimento; a temperatura; a humidade; a profundidade da carbonatação; e o estado de conservação dos varões (2).

Tipo de cimento

Quanto melhor for a qualidade do betão e a espessura do recobrimento, maior será o limite do teor de cloretos para o início da corrosão, tanto a especificação LNEC E 464 como a NP EN 206-1 estabelecem diferentes classes de exposição a aplicar nos diferentes casos (tais classes serão reveladas no capítulo do enquadramento legislativo na presente dissertação).

Compactação e cura

A compactação como o nome indica consiste em compactar o betão, isto é, provocar a saída do ar existente no betão através do rearranjo das partículas do mesmo. Esta saída do ar resulta numa menor porosidade que por sua vez resulta numa menor penetração dos cloretos. A cura e o seu período irá

determinar o grau de hidratação das partículas de cimento na camada superficial do recobrimento, a um aumento do período conduz a um aumento da resistência à penetração dos cloretos

Razão água/cimento

Como foi estipulado anteriormente, quanto maior for a dimensão dos poros mais fácil será a penetração dos cloretos através dos líquidos, quanto aos gases, estes não dependem do tamanho dos poros mas sim de toda a estrutura porosa devido às suas moléculas serem muito inferiores às moléculas de líquidos. Com uma redução da razão água/cimento (sem considerar outras adições), os poros tendem a reduzir de tamanho reduzindo assim a permeabilidade e consequentemente a entrada de cloretos. Apesar de o tamanho dos poros ser um fator determinante na penetração dos poros, a condutividade dos poros também o é porque formam uma rede porosa interligada no interior do betão, esta rede pode também ser interrompida eliminando a sua continuidade reduzindo a razão água/cimento com períodos de cura adequados. Esta descontinuidade deve-se à formação de um tipo de gel denominada de silicato de cálcio hidratado (CSH) resultante da diminuição de A/C. Consequência duma menor porosidade será o aumento da resistência do betão devido a uma ligação mais resistente e menor desenvolvimento de cristais de hidróxido de cálcio (22). Na Figura 2.13 apresenta a influência da razão água cimento no coeficiente de difusão, quanto maior a razão A/C maior o coeficiente de difusão que resulta numa melhor penetração dos cloretos. De acordo com a especificação LNEC E 464 os cimentos pozolânicos e de alto forno são os mais indicados para estruturas inseridas em ambientes com o teor de cloretos elevado, tal comprova-se na Figura 2.13.

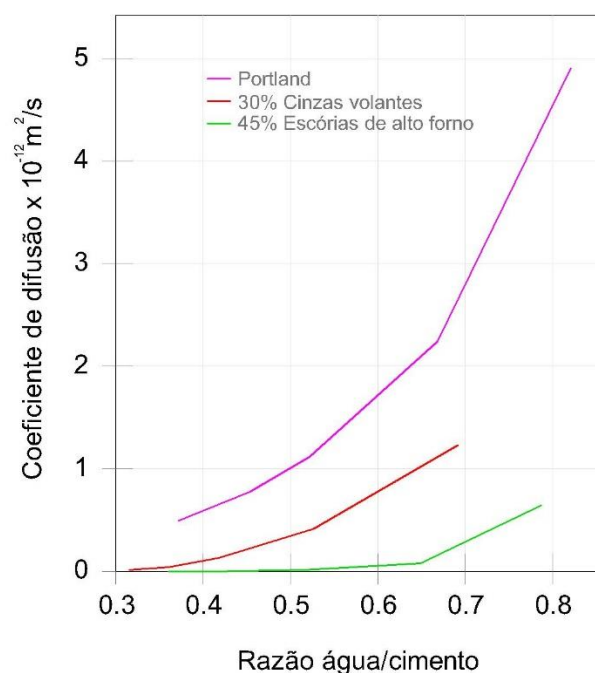


Figura 2.13 – Coeficiente de difusão com uma variação da razão água/cimento (22)

Temperatura

A variação de temperatura conduzirá à libertação dos cloretos combinados, ou seja os cloretos presos fisicamente na superfície dos poros e quimicamente a C_3A libertar-se-ão para cloretos livres (21).

Humidade

O teor de humidade que apresenta maior risco para o ataque dos cloretos situa-se entre os 75 e 85 %, uma humidade até os 50% e em ambientes saturados o limite dos teor crítico de cloretos é superior devido à maior resistividade do betão e restrição do oxigénio às armaduras respetivamente (Figura 2.14) (21).

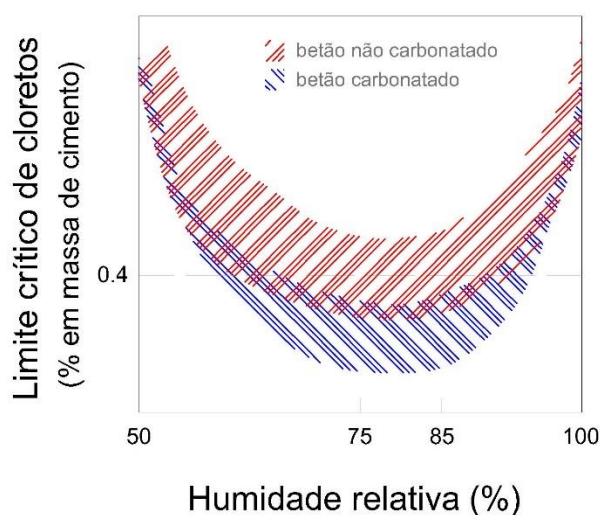


Figura 2.14 – Limites críticos de cloretos (2)

Profundidade de carbonatação

Os cloretos ao atuar em conjunto com a carbonatação, aceleram o processo de corrosão das armaduras (2.3.3).

Estado de conservação dos varões

O processo de corrosão torna-se agravado na presença de cloretos quando existe a despassivação das armaduras devido ao decréscimo da alcalinidade ou as mesmas já se encontram em corrosão pela carbonatação.

2.3.3. CARBONATAÇÃO E CLORETOS EM SIMULTÂNEO

A corrosão das armaduras após a despassivação das armaduras, pode ser iniciada pela carbonatação ou pela ação dos cloretos e os dois em conjuntamente gerando efeitos com maior intensidade. Apesar de não existirem muitos estudos sobre este tema, sabe-se que na presença dos dois agentes em simultâneo o processo de corrosão pode acontecer muito antes do previsto (39). O aumento da velocidade de corrosão está relacionado com o decréscimo da alcalinidade pela carbonatação, o pH ao descer liberta os iões Cl^- existentes no sal de Friedel aumentando consideravelmente os cloretos livres e por sua vez a agressividade de corrosão (40). Uma vez que o processo da carbonatação é comum nos elementos de betão armado, as condições mais gravosas para os dois processos em simultâneo serão aquelas em que o ambiente envolvente contem maior contaminação de cloretos, como é o caso dos elementos estruturais junto ao mar. Os cloretos existentes entram em contato com o betão através das marés, de rebentação de ondas e salpicos e também são transportadas pelo vento, em zonas que o elemento esteja submerso o risco de corrosão não é grave (41). De forma a reduzir a velocidade da penetração dos agentes nas situações indicadas, deve-se utilizar o betão prescrito pelas normas com rigor.

2.3.4. CORROSÃO DAS ARMADURAS

A corrosão das armaduras é reconhecida como o fator predominante que limita a vida de serviço de estruturas de betão armado, expostas a ambientes agressivos (42). A corrosão eletroquímica abordada anteriormente pode manifestar-se através de diferentes formas no caso dos metais, embora possua mecanismos idênticos com a formação de zonas anódicas e catódicas. Fong-Yuan Ma (43) diz que a corrosão pode ser por picadas, galvânica, intersticial, filiforme, seletiva, intergranular, devido a ações mecânicas, microbiológica e uniforme, onde esta ultima é a única que faz sentido salientar para esta dissertação tendo em conta que apenas se refere as armaduras ordinárias de aço e pré-esforço no interior do betão. Tal processo provoca uma redução da armadura e diminui desta forma a resistência à tração, a resistência à fadiga e confere uma maior deformação ao elemento de betão armado, causa também a fissuração e a delaminação do betão, onde este perde seção e a aderência dos varões, aumenta também a taxa de corrosão (44). Pela fragilização por hidrogénio e quando na presença de fenómenos de corrosão sob tensão, poderá ocorrer a rotura frágil das armaduras ou até o colapso das mesmas (2). Uma perda de seção do aço pelo efeito da corrosão resulta também numa perda de ductilidade do mesmo diminuindo a extensão na rotura (45).

O dióxido de carbono e os iões cloreto são os principais agentes responsáveis pelo processo da corrosão das armaduras, contudo não prejudicam a integridade do betão apesar de se encontrarem no mesmo, mas

quando esses agentes chegam às armaduras corroem-nas e esta corrosão é que trará problemas ao betão. São muitos os fatores que podem desencadear o processo de corrosão das armaduras, sendo os mais relevantes: a dosagem de cimento, a razão água-cimento, a compactidade, a homogeneidade do betão, a cura do betão, o estado da superfície e presença de elevadas tensões nos varões, a humidade, o oxigénio, a temperatura, os iões despassivantes e dióxido de carbono atmosférico (2).

Na Figura 2.15 apresenta o período da corrosão das armaduras de acordo com o tipo de agente agressor nomeadamente ataque por carbonatação e por cloretos. Em ambos os casos uma melhor resistência do betão resulta num recobrimento mínimo inferior face a uma classe de resistência mais baixa, isto deve-se à dificuldade da penetração dos agentes agressores no caso de um betão mais resistente (46). Quanto à penetração dos agentes para a mesma classe de resistência do betão, facilmente podemos observar que os cloretos corroem numa escala muito superior face à carbonatação, temos por exemplo um C45 aos 90 anos tem uma penetração de carbonatação de 1 cm enquanto que os cloretos 10 cm.

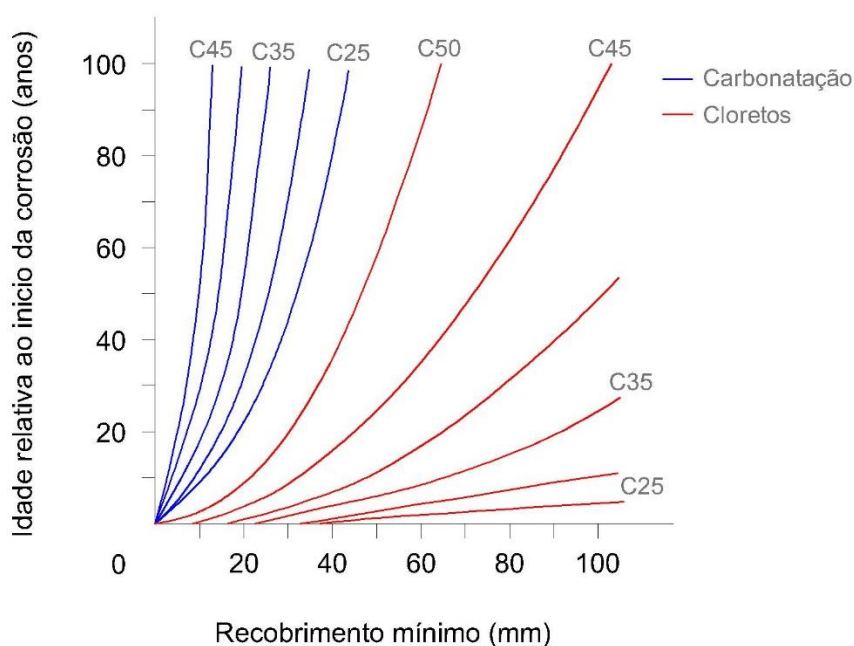


Figura 2.15 – Relação entre a espessura do recobrimento e o período de iniciação da corrosão (2)

2.3.4.1. CORROSÃO UNIFORME

A corrosão uniforme acontece em toda a superfície do metal quando exposta ao agente corrosivo, onde diminui a sua espessura uniformemente (47). Na Figura 2.16 apresenta-se um exemplo de corrosão uniforme onde podemos observar que o metal corrói uniformemente de acordo com a sua exposição, apesar de a peça em questão possui uma camada de tinta protetora, os cloretos acabam sempre por atingir o metal mais rápido em certas zonas no que outras devido a irregularidades. Uma vez que os cloretos

chegam ao aço, começa o processo de corrosão e a tinta (em barras de aço pintadas) à volta da zona atingida começa-se a soltar-se à volta do aço expondo mais aço aos agentes agressores, reduzindo a espessura até que a peça deixe de existir.

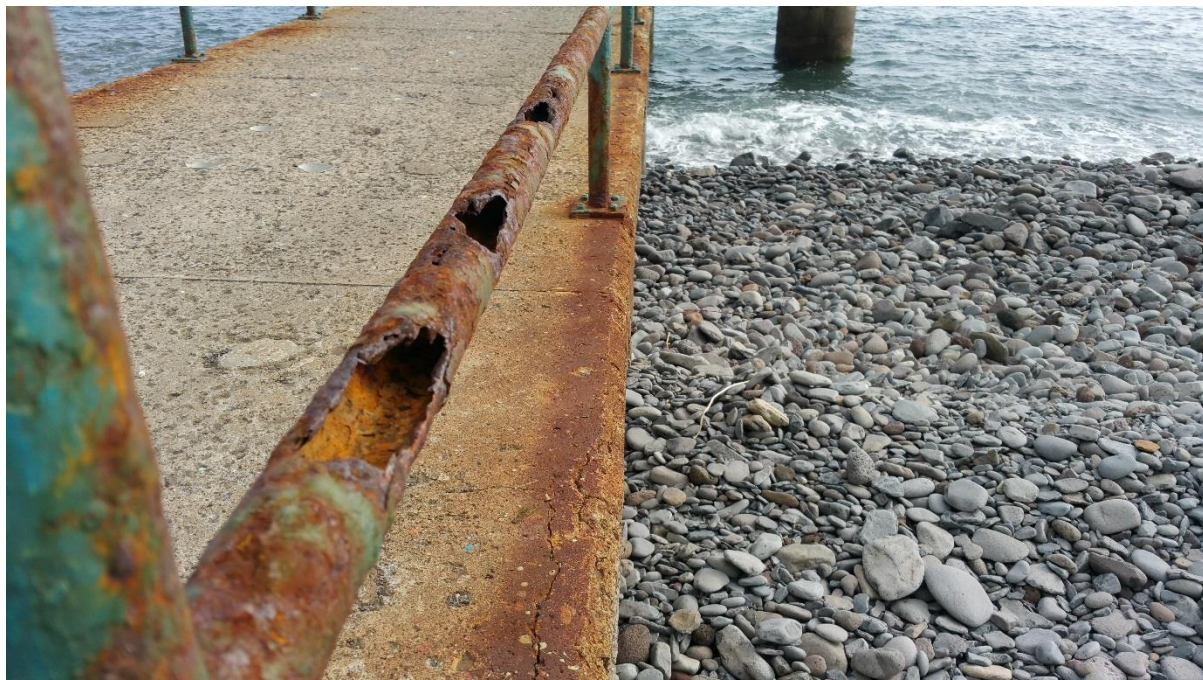


Figura 2.16 – Corrosão uniforme numa varanda de aço junto ao mar

Este tipo de corrosão é comum nas armaduras do betão armado quando estas estão expostas aos agentes agressores. No caso de elementos de betão armado, quando os agentes corrosivos destroem a película passiva das armaduras, estas entram em corrosão localizada, mais concretamente na zona despассивada que se expandirá ao resto das armaduras através da degradação do betão causada pela própria corrosão (48). No dimensionamento de algumas estruturas, em fase de projeto, o projetista poderá ter em consideração a perda de secção devido à corrosão aumentando a mesma para garantir o tempo de vida pretendido da estrutura (2).

2.3.4.2. ETAPAS DA CORROSÃO

A corrosão das armaduras pode ser descrita em 3 etapas: o período da corrosão inicial; a permanência de ferrugem ou o período inicial de fendilhação; e o período da propagação das fendas (41). O período inicial define o tempo que demora para os cloretos presentes no ambiente chegarem ao aço, através do recobrimento e/ou acumulação em quantidade significativa no betão, de forma a destruir a película passiva do aço e iniciar a sua corrosão, durante este período não há a ocorrência de danos (41). O período da fendilhação inicial define o tempo que demora para o aparecimento da ferrugem para gerar tensões

internas, que leva à fendilhação do recobrimento e o período de propagação da fendilhação define a expansão das fendas.

2.4. PATOLOGIAS NO BETÃO

As estruturas tradicionais têm como materiais principais o betão e as armaduras nele contido denominado de betão armado. Sem estes dois componentes em simultâneo não seria possível suportar o peso das estruturas como os carregamentos previstos, utilizando apenas o betão. O betão armado utilizado em elementos estruturais garante a eficácia e a durabilidade dos mesmos, quando estes estão sujeitos a forças de tração e/ou compressão. O betão protege as armaduras contra a corrosão através do recobrimento que constitui uma barreira física e química contra a entrada de agentes agressores, a corrosão das armaduras é a principal causa de deterioração dos elementos de betão armado (20). Podem ser muitas as causas que originam ou influenciam este fenómeno, porém as principais são devido à ação dos iões de cloreto e da carbonatação (49), como foram referidas anteriormente.

Existem algumas patologias como a fendilhação, a delaminação, a desagregação do betão e a erosão que contribuem para a aceleração da corrosão das armaduras, entre as patologias criadas no betão como consequência da corrosão das armaduras, como a delaminação do betão, deformações ou até colapso parcial ou total da estrutura pelo desaparecimento das armaduras.

2.4.1. FENDILHAÇÃO

A fendilhação no betão devido à corrosão das armaduras tem uma influência substancial no desempenho e segurança da estrutura de betão armado (Figura 2.17). Não só afeta a estética criando a necessidade de manutenção, como também acelera o processo de corrosão dos varões de aço alimentando a corrosão com oxigénio e água pela zona fendilhada, que futuramente irá criar novas fendas (1). Tanto a fendilhação como a delaminação irão diminuir a seção do elemento estrutural, e como resultado irá alterar o comportamento da estrutura e diminuir a sua capacidade de serviço. A fendilhação pode ter diferentes origens, pode ocorrer devido às forças internas no betão de retração ou devido à variação de temperatura (deformações impedidas), sendo muito comum em peças longas de betão, pode ocorrer devido ao excesso de carga aplicada como por exemplo em vigas, e pode também ocorrer devido à expansão das armaduras durante a corrosão das mesmas.



Figura 2.17 – Aceleração da corrosão das armaduras devido à fendilhação do betão

2.4.2. DELAMINAÇÃO

A delaminação no betão entende-se como um destacamento de uma porção de uma peça de betão (Figura 2.18). Pode ser provocado devido a reações expansivas internas no betão ou devido à corrosão das armaduras sendo muito comum em armaduras corroídas muito próximas. As reações expansivas internas devem-se a reações álcalis-sílicas e sulfáticas, estas quando ocorrem conduzem à delaminação ou à perda de resistência em determinadas condições, devido à criação de compostos expansivos (50). A delaminação devido à corrosão das armaduras ocorre quando as mesmas expandem-se criando forças de tração internas conduzindo ao destacamento do recobrimento, tal acontece devido à proximidade das armaduras entre elas que faz com que o recobrimento entre as armaduras não tenham área suficiente para contrariar a tensão exercida pela expansão provocada pela corrosão das armaduras. Caso a área fosse suficiente ocorreria a fendilhação em vez da delaminação.

Em ambos os casos ocorre a aceleração da corrosão das armaduras, sendo esta mais acentuada na delaminação causada pela corrosão das armaduras uma vez que as expõe diretamente com o exterior, delaminação causada pelas reações expansivas internas contribuirá para a corrosão mas numa escala

inferior uma vez que o destacamento poderá ser até numa zona onde não exista armaduras, ou simplesmente a espessura do destacamento poderá ser inferior à do recobrimento.



Figura 2.18 – Exposição das armaduras devido à delaminação do betão

2.4.3. DESAGREGAÇÃO E EROSÃO DO BETÃO

A pasta de cimento utilizada no betão tem uma resistência ao desgaste inferior à dos seus agregados, onde esta é o fator condicionante para a desagregação e erosão do betão, uma vez que a desagregação e erosão do betão deve-se à sua perda (Figura 2.19). O seu desencadeamento está associado à movimentação física de partículas de líquidos, ao impacto de outros objetos assim como o deslizamento dos mesmos. Pode também ocorrer a desagregação do betão através de processos químicos como a presença de ácido, água pura e sulfatos (51). O fogo também é um condicionante que pode conduzir à

desagregação do betão. É um processo lento mas que certamente reduz a espessura do recobrimento e facilita a penetração dos agentes agressores às armaduras.



Figura 2.19 – Desagregação e erosão do betão

2.4.4. INFILTRAÇÕES

Como foi referido na seção da fendilhação, a infiltração é uma forma de penetração direta ao interior do betão, porque permite que líquidos e gases tenham acesso imediato às armaduras. Apesar de a fendilhação ser o processo mais comum que provoca as infiltrações existem também outros como por exemplo as infiltrações de água em juntas de betonagens deficientes (Figura 2.20).

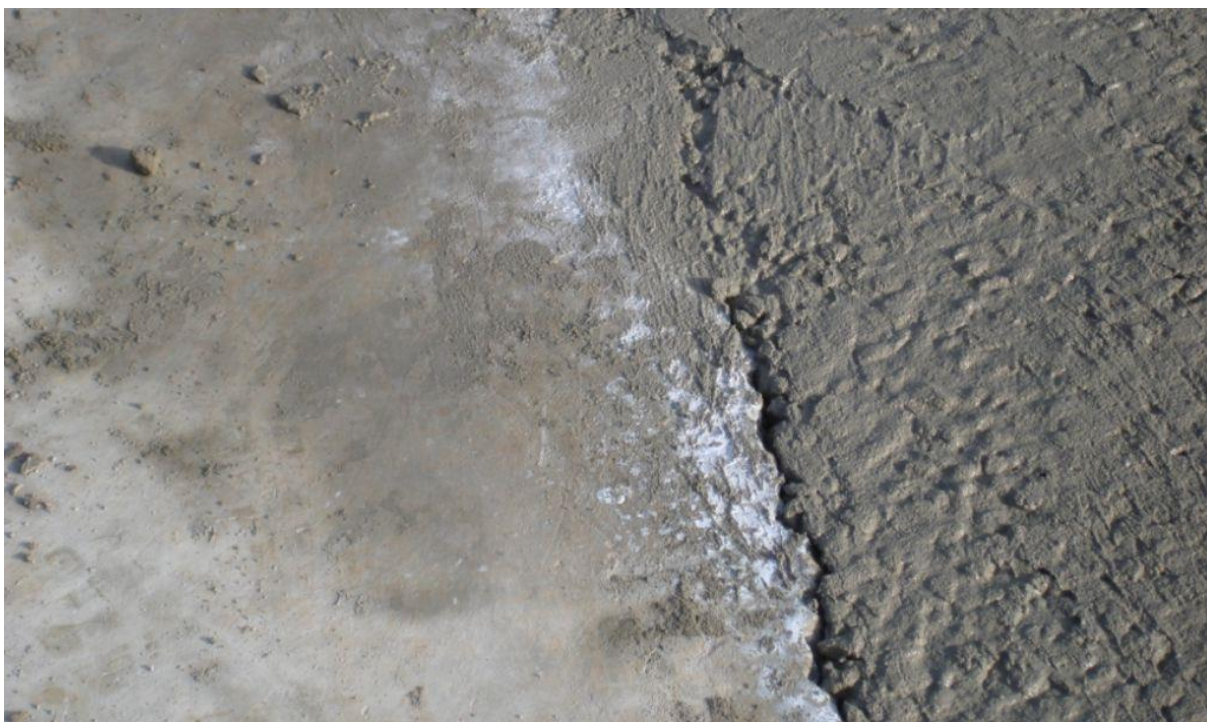


Figura 2.20 – Exemplo de uma má junta de betonagem (52)

2.4.5. DEFORMAÇÕES

As deformações não provocam a corrosão diretamente mas podem acelerar o início da corrosão das armaduras. É mais usual em lajes, estas após se deformarem (como por exemplo devido à fluência) possuem boa capacidade de retenção de líquidos impedido o seu escoamento (poças de água) (Figura 2.21), devido a essa retenção faz com que a penetração dos mesmos no betão seja mais prolongada o que resulta numa penetração mais profunda, com o ciclo molhagem secagem resulta numa grande acumulação de cloretos a profundidades superiores ao previsto.



Figura 2.21 – Acumulação de água devido a deformações na laje (53)

2.4.6. DETERIORAÇÃO CAUSADA POR ERROS/DEFICIÊNCIAS

Além das patologias mencionadas anteriormente que condicionam a corrosão das armaduras, existem outros fatores que também irão influenciar devido a erros humanos (54):

- Problemas e/ou deficiências de projeção;
- Deficiente drenagem e impermeabilização;
- Deficiente pormenorização das armaduras;
- Deficiente controlo da fendilhação;
- Conceção estrutural inadequada – juntas de dilatação;
- Formas estruturais sensíveis à deterioração;
- Efeito de canto;
- Elementos esbeltos em ambientes muito agressivos;
- Deficiente avaliação das ações/esforços atuantes;
- Deficiências de execução:
 - Seleção inadequada dos materiais;

- Fabrico do betão;
- Cofragens deficientes;
- Posicionamento das armaduras;
- Recobrimentos – espaçadores;
- Colocação – compactação do betão;
- Cura do betão;
- Remoção prematura do escoramento da cofragem.

3

ENQUADRAMENTO LEGISLATIVO

3.1. NP EN 206-1 2007

A norma europeia 206-1 de 2007 (3) dedica uma especial atenção às características e especificações do betão, mais concretamente como o título da norma indica Especificação, desempenho, produção e conformidade. Esta norma sucede à NP ENV 206 de 1993, e resulta de uma revisão da mesma tendo em consideração uma evolução dos aspetos produtivos, da durabilidade das estruturas e das metodologias de ensaio de acordo com a evolução tecnológica (28).

Apesar da NP EN 206-1 2007 referir vários temas adjacentes ao betão, nesta dissertação apenas faz sentido referir os parâmetros que mais influenciam a degradação do betão pela corrosão das armaduras, mais concretamente a classificação do betão de acordo com as exigências ambientais, o aparecimento dos cloretos, o teor de cloretos admissível e valores limites para a composição do betão.

3.1.1. CLASSIFICAÇÃO

Devido à existência de condições ambientais diversas e distintas, a NP EN 206-1 2007 atribui uma classificação a nível de classe de exposição, ao betão de forma a possibilitar uma prescrição ao mesmo garantindo o seu comportamento estrutural e durabilidade. Salienta-se que a NP EN 206-1 2007 não exclui a utilização de medidas complementares como por exemplo revestimentos protetores do betão, utilização de aço inoxidável entre outras medidas de acordo com as exigências ambientais, onde conclui-se de acordo com a norma, que a utilização da classe correta do betão por si só não deve ser considerada como solução única, de forma a maximizar o aproveitamento do elemento de betão.

O betão é classificado em seis classes de exposição, tendo algumas delas diferentes classificações dentro das classes de acordo com a descrição do ambiente, as quais se apresentam no **Quadro 3.1**.

Quadro 3.1 - Classes de exposição da NP EN 206-1 2007

Designação da classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos onde podem ocorrer as classes de exposição
1 Sem risco de corrosão		
X0	<ul style="list-style-type: none"> • Para betão não armado e sem metais embebidos: todas as exposições, exceto ao gelo/degelo, à abrasão ou ao ataque químico. • Para betão armado ou com metais embebidos: ambiente muito seco. 	<ul style="list-style-type: none"> • Betão no interior de edifícios com muita baixa humidade do ar.
2 Corrosão induzida por carbonatação		
XC1	<ul style="list-style-type: none"> • Seco ou permanentemente húmido. 	<ul style="list-style-type: none"> • Betão no interior de edifícios com baixa humidade do ar; • Betão permanentemente submerso em água.
XC2	<ul style="list-style-type: none"> • Húmido, raramente seco. 	<ul style="list-style-type: none"> • Superfícies de betão sujeitas a longos períodos de contato com a água; • Muitas fundações.
XC3	<ul style="list-style-type: none"> • Moderadamente húmido. 	<ul style="list-style-type: none"> • Betão no interior de edifícios com moderada ou elevada humidade do ar; • Betão no exterior protegido da chuva.
XC4	<ul style="list-style-type: none"> • Ciclicamente húmido e seco. 	<ul style="list-style-type: none"> • Superfícies de betão sujeitas ao contato com a água, fora do âmbito da classe XC2.
3 Corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar		
XD1	<ul style="list-style-type: none"> • Moderadamente húmido. 	<ul style="list-style-type: none"> • Superfícies de betão exposta a cloretos transportados pelo ar.
XD2	<ul style="list-style-type: none"> • Húmido, raramente seco. 	<ul style="list-style-type: none"> • Piscinas; • Betão expostos a águas industriais contendo cloretos.
XD3	<ul style="list-style-type: none"> • Ciclicamente húmido e seco. 	<ul style="list-style-type: none"> • Partes de pontes expostas a salpicos de água contendo cloretos; • Pavimentos; • Lajes de parques de estacionamento de automóveis.
4 Corrosão induzida por cloretos da água do mar		
XS1	<ul style="list-style-type: none"> • Ar transportando sais marinhos mas sem contato direto com a água do mar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Estruturas na zona costeira ou na sua proximidade.
XS2	<ul style="list-style-type: none"> • Submersão permanente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Partes de estruturas marítimas.
XS3	<ul style="list-style-type: none"> • Zonas de marés, de rebentação ou de salpicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Partes de estruturas marítimas.
5 Ataque pelo gelo/degelo com ou sem produtos descongelastes		

XF1	<ul style="list-style-type: none"> Moderadamente saturado de água, sem produtos descongelantes. 	<ul style="list-style-type: none"> Superfícies verticais de betão expostas à chuva e ao gelo.
XF2	<ul style="list-style-type: none"> Moderadamente saturado de água, com produtos descongelantes. 	<ul style="list-style-type: none"> Superfícies verticais de betão de estruturas rodoviárias expostas ao gelo e a produtos descongelantes transportados pelo ar.
XF3	<ul style="list-style-type: none"> Fortemente saturado, sem produtos descongelantes. 	<ul style="list-style-type: none"> Superfícies horizontais de betão expostas à chuva e ao gelo.
XF4	<ul style="list-style-type: none"> Fortemente saturado, com produtos descongelantes. 	<ul style="list-style-type: none"> Estradas e tabuleiros de pontes expostos a produtos descongelantes; Superfícies de betão expostas ao gelo e a salpicos de água contendo produtos descongelantes; Zona das estruturas marítimas expostas à rebentação e ao gelo.
6 Ataque químico		
XA1	<ul style="list-style-type: none"> Ligeiramente agressivo de acordo com o Quadro 3.2. 	
XA2	<ul style="list-style-type: none"> Moderadamente agressivo de acordo com o Quadro 3.2. 	
XA3	<ul style="list-style-type: none"> Fortemente agressivo de acordo com o Quadro 3.2. 	

O **Quadro 3.2** dá seguimento ao ataque químico do **Quadro 3.1**, este ataque é proveniente de solos naturais e de águas subterrâneas com temperaturas entre 5°C e 25°C e com velocidades da água lentas, tal que possam ser consideradas estáticas.

Quadro 3.2 - Valores limite das classes de exposição para ataque químico proveniente de solos naturais e de águas neles contidas da NP EN 206-1 2007

Caraterística química	Método de ensaio de referência	XA1	XA2	XA3
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 ^{a)} mg/kg	EN 196-2 ^{b)}	≥ 2000 e ≤ 3000 ^{c)}	> 3000 ^{c)} e ≤ 12000	> 12000 e ≤ 24000
Acidez ml/kg	DIN 4030-2	> 200 Baumann Gully	Não encontrado na prática	

- a) Os solos argilosos com uma permeabilidade abaixo de 10^{-5} m/s podem ser colocados numa classe mais baixa.
 b) O método de ensaio prescreve a extração do SO_4^{2-} através de ácido clorídrico; em alternativa, pode usar-se a extração aquosa, se houver experiência no local de utilização do betão.
 c) O limite de 3000 mg/kg deve ser reduzido para 2000 mg/kg, caso exista risco de acumulação de iões sulfato no betão devido a ciclos de secagem ou à absorção capilar.

3.1.2. REQUISITOS PARA O BETÃO

Na proteção do betão e das armaduras deve ser tida em conta duas fases:

- No momento de betonagem: o betão deve conter quantidades de agentes nocivos ao betão e às armaduras mínimas, tais que não sejam suficientes para prejudicar a durabilidade do betão ou causar corrosão nas armaduras;
- Após a betonagem: A proteção das armaduras contra agentes nocivos deve ser garantida e o betão deve possuir características tais, que evitem a penetração dos agentes invasores de acordo com o meio ambiente que se encontra, durante o tempo de vida projetado da estrutura.

Os materiais constituintes do betão devem obedecer às respetivas normas, quer eles sejam cimento, agregados, água de amassadura, adjuvantes e adições, assim como a escolha dos constituintes devem constituir um betão com a composição prescrita para a aplicação desejada, tendo em conta as condições ambientais e exigências estruturais.

3.1.2.1. TEOR DE CLORETOS

Na conceção do betão, este não deve ter um teor de cloretos superior ao indicado no **Quadro 3.3**. O cloreto de cálcio e os adjuvantes à base de cloretos não devem ser adicionados ao betão contendo armaduras, de aço ou pré-esforço assim como qualquer tipo de metal.

Quadro 3.3 - Máximo teor de cloretos do betão da NP EN 206-1 2007

Utilização do betão	Classe do teor de cloretos	Máximo teor de Cl^- por massa de cimento ^{b)}
Sem armaduras de aço ou outros materiais embebidos, com exceção de dispositivos de elevação resistentes à corrosão	Cl 1,0	1,0 %
Com armaduras de aço ou outros metais embebidos	Cl 0,20 *	0,20 %
	Cl 0,40 **	0,40 %
Com aço de pré-esforço	Cl 0,10 *	0,10 %
	Cl 0,20 **	0,20 %

* Betões com classe de exposição XS e XD
 ** Betões com classe de exposição XC, XF e XA

3.1.3. VALORES LIMITE RECOMENDADOS PARA A COMPOSIÇÃO DO BETÃO

Há uma necessidade de limitar a composição das propriedades do betão de acordo com as classes de exposição para garantir o seu bom funcionamento, para tal a NP EN 206-1 2007 estabelece limites quanto à razão água/cimento máxima, à classe de resistência mínima do betão, à dosagem mínima de cimento, ao teor de ar mínimo, entre outros requisitos de acordo com o **Quadro 3.4**.

Quadro 3.4 - Valores limite para a composição e para as propriedades do betão da NP EN 206-1 2007

	Classes de exposição																		
	Sem risco de corrosão ou ataque	Corrosão induzida por										Ataque pelo gelo/degelo				Ambientes químicos agressivos			
		Carbonatação				Cloretos provenientes													
		X0	XC1	XC2	XC3	XC4	Da água do mar			de outras origens			XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3
Máxima razão A/C	-	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,45	0,55	0,55	0,45	0,55	0,55	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45	
Mínima classe de resistência	C12/15	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45
Mínima dosagem de cimento (kg/m ³)	-	260	280	280	300	300	320	340	300	300	320	300	300	320	340	300	320	360	
Mínimo teor de ar (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,0 ^a	4,0 ^a	4,0 ^a	-	-	-	
Outros requisitos												Agregados conformes com a EN 12620:2002 com suficiente resistência ao gelo/degelo				Cimento resistente aos sulfatos			

^a Se o betão não tiver ar incorporado, o seu desempenho deverá ser avaliado com um método de ensaio apropriado, tendo como referencia um betão cuja resistência ao gelo/degelo, para classe de exposição aplicável, se encontre estabelecida.
^b Quando o SO₄²⁻ conduzir às classes de exposição XA2 e XA3, é essencial utilizar cimento resistente aos sulfatos. Se o cimento estiver classificado quanto à resistência aos sulfatos, deverá ser utilizado cimento de moderada ou elevada resistência aos sulfatos na classe de exposição XA2 (e quando aplicável na XA1) e o cimento de elevada resistência aos sulfatos na classe de exposição XA3.

3.2. ESPECIFICAÇÃO LNEC 464 2007

A Especificação LNEC 464 2007 (55) funciona como um complemento da NP EN 206-1 2007 e esclarece, no que diz respeito a esta dissertação, as classes de exposição e fixa medidas prescritivas para satisfazer a durabilidade do betão por 50 ou 100 anos.

3.2.1. DEGRADAÇÃO DO BETÃO E AS CLASSES DE EXPOSIÇÃO

Dependendo das condições ambientais a que o betão está exposto, poderá resultar na sua degradação através de reações químicas expansivas, entre outras ações como por exemplo ações térmicas, fluência, retrações e até desgaste.

Como na NP EN 206-1 2007, o betão tem seis grupos de classes de exposição, correspondendo três delas à deterioração do betão através da corrosão das armaduras pelo ataque de cloretos e por ação com o dióxido de carbono, duas correspondem à deterioração do betão pela ação do gelo/degelo e ataque químico e uma corresponde a um betão que não está sujeito a qualquer tipo de ataque que possa comprometer as características ou betão ou das armaduras nele embebidas.

Uma vez que a Especificação LNEC 464 2007 foi elaborada para ser aplicada em Portugal, o **Quadro 3.1** foi submetido a algumas alterações, sendo estas a inserção de novos exemplos de aplicação e a eliminação das classes XF3 e XF4 pelo facto de não serem aplicadas no país mencionado. Assim sendo, ao **Quadro 3.1** é acrescentado, pela especificação do LNEC os pontos do **Quadro 3.5**. É de referir que o grupo 6 *Ataque químico* não consta no **Quadro 3.5** porque não houve alterações, embora especifique recomendações quanto ao ataque das bactérias dos esgotos que deve ser considerado classe XA3 e classes superiores às classes XA1 e XA2 quando exista acumulação de sulfatos devido a ciclos de secagem e molhagem como de absorção capilar, contudo todo o grupo 6 consta nas classes aplicadas em Portugal.

Quadro 3.5 – Outros exemplos onde ocorrem as classes de exposição, inseridos pela especificação LNEC E 464 – 2007 à NP EN 206-1 2007

Designação da classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos onde podem ocorrer as classes de exposição
1 Sem risco de corrosão		
X0	<ul style="list-style-type: none"> • Para betão sem armaduras: todas as exposições, exceto ao gelo/degelo, à abrasão ou ao ataque químico. • Para betão armado: muito seco. 	<ul style="list-style-type: none"> • 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 armado em ambiente muito seco; • Betão no interior de edifícios com muita baixa humidade do ar.
2 Corrosão induzida por carbonatação		
XC1	<ul style="list-style-type: none"> • Seco ou permanentemente húmido. 	<ul style="list-style-type: none"> • Betão armado no interior de edifícios ou estruturas, com exceção das áreas com humidade elevada;

		<ul style="list-style-type: none"> • Betão armado permanentemente submerso em água não agressiva.
XC2	<ul style="list-style-type: none"> • Húmido, raramente seco. 	<ul style="list-style-type: none"> • Betão armado enterrado em solo não agressivo; • Betão armado sujeito a longos períodos de contato com água não agressiva.
XC3	<ul style="list-style-type: none"> • Moderadamente húmido. 	<ul style="list-style-type: none"> • Superfícies exteriores de betão armado protegidas da chuva transportada pelo vento; • Betão armado no interior de estruturas com moderada ou elevada humidade do ar (v.g., cozinhas, casas de banho).
XC4	<ul style="list-style-type: none"> • Ciclicamente húmido e seco. 	<ul style="list-style-type: none"> • Betão armado exposto a ciclos de molhagem/secagem; • Superfícies exteriores de betão expostas à chuva ou fora do âmbito da XC2.
3 Corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar		
XD1	<ul style="list-style-type: none"> • Moderadamente húmido. 	<ul style="list-style-type: none"> • Betão armado em partes de pontes afastadas da ação direta doas sais descongelantes, mas expostas a cloretos transportados pelo ar; • Betão armado diretamente afetado pelos sais descongelantes ou pelos salpicos de água contendo cloretos.
XD2	<ul style="list-style-type: none"> • Húmido, raramente seco. 	<ul style="list-style-type: none"> • Betão armado completamente imerso em água contendo cloretos; • Piscinas.
XD3	<ul style="list-style-type: none"> • Ciclicamente húmido e seco. 	<ul style="list-style-type: none"> • Betão armado em que uma das superfícies está imersa em água contendo cloretos e a outra exposta ao ar (v.g., algumas piscinas ou partes delas); • Lajes de parques de estacionamento de automóveis e outros pavimentos expostos a sais contendo cloretos.
4 Corrosão induzida por cloretos da água do mar		
XS1	<ul style="list-style-type: none"> • Ar transportando sais marinhos mas sem contato direto com a água do mar. 	<ul style="list-style-type: none"> • Betão armado em ambiente marítimo saturado de sais; • Betão armado em áreas costeiras perto do mar, diretamente exposto e a menos de 200 m do mar; esta distância pode ser aumentada até 1 km nas costas planas e foz de rios.
XS2	<ul style="list-style-type: none"> • Submersão permanente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Betão armado permanentemente submerso.
XS3	<ul style="list-style-type: none"> • Zonas de marés, de rebentação ou de salpicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • 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.

		<ul style="list-style-type: none"> • Betão armado em que uma das superfícies está imersa em água do mar e a outra exposta ao ar (v.g., tuneis submersos ou abertos em rocha ou solos permeáveis no mar ou em estuário de rios). Esta exposição exigirá muito provavelmente medidas de proteção suplementares.
5 Ataque pelo gelo/degelo com ou sem produtos descongelantes		
XF1	<ul style="list-style-type: none"> • Moderadamente saturado de água, sem produtos descongelantes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Betão em superfícies verticais expostas à chuva e ao gelo; • Betão em superfícies não verticais mas expostas à chuva ou gelo.
XF2	<ul style="list-style-type: none"> • Moderadamente saturado de água, com produtos descongelantes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Betão, tal como nas pontes, classificável como XF1, mas exposto aos sais descongelantes direta ou indiretamente.

3.2.2. PRESCRIÇÕES PARA A COMPOSIÇÃO DO BETÃO

Esta especificação estabelece prescrições específicas para as estruturas de betão tenham uma vida útil de 50 ou 100 anos, entre prescrições gerais para qualquer tempo de vida útil.

3.2.2.1. PRESCRIÇÕES PARA VIDA ÚTIL DE 50 ANOS

Os valores limite do Quadro 3.4 são substituídos por valores estipulados pelo LNEC de acordo com os vários tipos de cimento disponíveis, como indica os quadros seguintes.

Quadro 3.6 - Limites da composição e da classe de resistência do betão sob ação do dióxido de carbono, para uma vida útil de 50 anos da especificação LNEC E 464 – 2007

Tipo de cimento	CEM I (referência); CEM II/A ¹				CEM II/B ¹ ; CEM III/A ² ; CEM IV ² ; CEM V/A ²			
	XC1	XC2	XC3	XC4	XC1	XC2	XC3	XC4
Mínimo recobrimento nominal (mm)	25	35	35	40	25	35	35	40
Mínima razão A/C	0,65	0,65	0,60	0,60	0,65	0,65	0,55	0,55
Mínima dosagem de cimento	240	240	280	280	260	260	300	300
Mínima classe de resistência	C25/30 LC25/2 8	C25/30 LC25/2 8	C30/37 LC30/3 3	C30/37 LC30/3 3	C25/30 LC25/2 8	C25/30 LC25/28	C30/37 LC30/3 3	C30/37 LC30/33

¹ Não aplicável aos cimentos II/A-T e II/A-W e aos cimentos II/B-T e II/B-W, respetivamente.
² Não aplicável aos cimentos com percentagem inferior a 50% de clínquer Portland, em massa.

Quadro 3.7 - Limites da composição e da classe de resistência do betão sob ação dos cloretos, para uma vida útil de 50 anos da especificação LNEC E 464 – 2007

Tipo de cimento	CEM IV/A (referência); CEM IV/B; CEM III/A; CEM III/B; CEM V; CEM II/B ¹ ; CEM II/A-D			CEM I; CEM II/A ¹		
Classe de exposição	XS1/XD1	XS2/XD2	XS3/XD3	XS1/XD1	XS2/XD2	XS3/XD3
Mínimo recobrimento nominal (mm)	45	50	55	45	50	55
Mínima razão A/C	0,55	0,55	0,45	0,45	0,45	0,40
Mínima dosagem de cimento	320	320	340	360	360	380
Mínima classe de resistência	C30/37 LC30/33	C30/37 LC30/33	C35/45 LC35/38	C40/50 LC40/44	C40/50 LC40/44	C50/60 LC50/55

¹ Não aplicável aos cimentos II-T, II-W, II/B-L e II/B-LL.

Quadro 3.8 - Limites da composição e da classe de resistência do betão sob ação do gelo/degelo, para uma vida útil de 50 anos da especificação LNEC E 464 – 2007

Tipo de cimento	CEM I (Referencia); CEM II/A ¹		CEM II/B ¹ ; CEM III/A ² ; CEM IV ² ; CEM V/A ²	
Classe de exposição	XF1	XF2	XF1	XF2
Mínima razão A/C	0,60	0,55	0,55	0,50
Mínima dosagem de cimento	280	280	300	300
Mínima classe de resistência	C30/37 LC30/33	C30/37 LC30/33	C30/37 LC30/33	C30/37 LC30/33
Teor mínimo de ar (%)	-	4,0	-	4,0

¹ Não aplicável aos cimentos II/A-T e II/A-W e aos cimentos II/B-T e II/B-W, respetivamente.
² Não aplicável aos cimentos com percentagem inferior a 50% de clínquer Portland, em massa.

Quadro 3.9 - Limites da composição e da classe de resistência à compressão do betão sob ataque químico, para uma vida útil de 50 anos da especificação LNEC E 464 – 2007

Tipo de cimento	CEM IV/A (referência); CEM IV/B; CEM III/A; CEM III/B; CEM V; CEM II/B ¹ ; CEM II/A-D	CEM I; CEM II/A ¹
-----------------	--	------------------------------

Classe de exposição	XA1	XA2 ²	XA3 ²	XA1	XA2 ²	XA3 ²
Mínima razão A/C	0,55	0,50	0,45	0,50	0,45	0,45
Mínima dosagem de cimento	320	340	360	340	360	380
Mínima classe de resistência	C30/37 LC30/33	C35/45 LC35/38	C35/45 LC35/38	C35/45 LC35/38	C40/50 LC40/44	C40/50 LC40/44
¹ Não aplicável aos cimentos II-T, II-W, II/B-L e II/B-LL.						
² Quando a agressividade resultar da presença de sulfatos, os cimentos devem satisfazer os requisitos mencionados nas prescrições gerais (5.3 da especificação do LNEC), nomeadamente a composição do clínquer de cimentos resistentes aos sulfatos (Quadro 10 da especificação do LNEC), aplicando-se ao betão as exigências estabelecidas neste quadro para o CEM IV.						

3.2.2.2. PRESCRIÇÕES PARA VIDA ÚTIL DE 100 ANOS

Relativamente às prescrições para que as estruturas de betão tenham uma vida útil de 100 anos, aplicam-se o **Quadro 3.6**, **Quadro 3.7**, **Quadro 3.8** e **Quadro 3.9** com as seguintes alterações:

- No **Quadro 3.6** e **Quadro 3.7**, o valor do recobrimento nominal é aumentado em 10 mm, em betões armados ou pré-esforçados quando sujeitos à ação de CO₂ ou cloretos;
- No **Quadro 3.8** e **Quadro 3.9**, aos betões sujeitos à ação do gelo/desgelo ou ao ataque químico, diminui-se a máxima razão água/cimento 0,05, aumenta-se a mínima dosagem de cimento em 20 kg/m³ e aumenta-se as classes de resistência à compressão simples dos betões.

3.2.3. COMBINAÇÕES DE CLASSES DE EXPOSIÇÃO

Algumas estruturas têm diferentes exposições ambientais, o que não faz sentido enquadrar o betão em apenas uma classe de exposição, assim a NP 206-1 2007 refere que nestas situações podem ser utilizadas combinações de classe de exposição para o mesmo betão. A E 464 – 2007 apresenta as combinações de classe de exposição possíveis sendo as mais frequentes as que constam no **Quadro 3.10**, onde possibilita assim a utilização de vários cimentos no mesmo betão correspondentes ao tipo de exposição ambiental.

Quadro 3.10 - Combinações de classes de exposição da especificação LNEC E 464 – 2007

XC2 com:	XD2
	XS + ataque da água do mar (XA1)
	XF1
	XA1, XA2 ou XA3
XC3 ou XC4 com:	XF1
	XD1 + XF2
	XS1
	XD3

	XS3 + ataque da água do mar (XA1)
XC4 com:	XA1, XA2 ou XA3

Em cada mistura correspondente a cada combinação apresentada no **Quadro 3.10**, devem ser utilizados os valores mais exigentes prescritos, quanto à mínima dosagem de cimento, a máxima razão água/cimento e classe de resistência, entre os valores respetivos das classes utilizadas na mistura.

3.2.4. RECOBRIMENTOS MÍNIMOS

Os recobrimentos mínimos existentes na presente especificação têm como finalidade a proteção do elemento de betão de acordo com as condições ambientais e apresentam-se no anexo B, fazendo diferenciação entre os elementos de betão armado e os elementos de betão pré-esforçado (**Quadro 3.11** e **Quadro 3.12**). Estes valores devem ser utilizados no NP EN 1992-1-1 2010 de acordo com outras exigências complementares como por exemplo a variação da espessura de acordo com o tamanho do agregado, o que aumentará certamente a espessura do recobrimento (estes cálculos apresentam-se no ponto 3.3.2 desta dissertação). A classe estrutural tem em conta o tempo de vida útil, a classe de resistência do betão, a forma estrutural e o controlo de qualidade. A classe de referência recomendada é a S4 e corresponde a um período de vida de 50 anos, contudo esta classe pode ser alterada pelo quadro NA-4.4.1.2 da NP EN 1992-1-1 2010.

Quadro 3.11 - Recobrimentos mínimos (mm) $c_{min,dur}$ no betão armado na E 464 – 2007

Classe estrutural	Classe de exposição ambiental						
	X0	XC1	XC2/3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
1	10	10	10	15	20	25	30
2	10	10	15	20	25	30	35
3	10	10	20	25	30	35	40
4	10	15	25	30	35	40	45
5	15	20	30	35	40	45	50
6	20	25	35	40	45	50	55

Quadro 3.12 - Recobrimentos mínimos (mm) $c_{min,dur}$ no betão pré-esforçado na E 464 – 2007

Classe estrutural	Classe de exposição ambiental						
	X0	XC1	XC2/3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
1	10	10	20	25	30	35	40
2	10	15	25	30	35	40	45

3	10	20	30	35	40	45	50
4	10	25	35	40	45	50	55
5	15	30	40	45	50	55	60
6	20	35	45	50	55	60	65

3.3. EUROCÓDIGO 2 PARTE 1-1 (NP EN 1992-1-1 2010)

O Eurocódigo 2 (NP EN 1992-1-1 2010) (56) refere que a corrosão do aço nos elementos de betão armado depende de vários fatores, da compacidade, da qualidade e da espessura do recobrimento e da fendilhação. A compacidade é condicionada pela granulometria dos agregados, quanto maior for a compacidade menor será o índice de vazios (4) resultando em baixa porosidade o que torna-se desfavorável para a entrada dos agentes agressores. A compacidade e a qualidade do betão é controlada pelo valor máximo da razão da água-cimento e o teor mínimo de cimento e está também associada a uma classe de resistência mínima do betão. Quanto à fendilhação esta pode ser controlada com a inserção de armaduras mínimas em locais estratégicos, note-se que se esta armadura for insuficiente ocorrerá fendilhação e permitirá a entrada de agentes nocivos resultando posteriormente na corrosão das armaduras mínimas onde se expandirão e provocarão a desagregação do betão.

3.3.1. CLASSES DE RESISTÊNCIA E DE EXPOSIÇÃO

O **Quadro 3.1** repete-se da mesma forma no presente Eurocódigo fazendo referência à NP EN 206-1 2007. O anexo E do Eurocódigo 2 refere, tal como a NP EN 206-1 2007, as classes de resistência a utilizar de acordo com as classes de exposição ambientais, correspondendo estas ao Quadro 3.4. Para garantir a durabilidade das estruturas, o betão e as armaduras devem estar bem protegidos onde a composição do betão deve ser apreciada. Esta apreciação pode conduzir a um betão com resistência à compressão superior à requerida estruturalmente, caso tal se verifique deve ser utilizada o f_{ctm} da resistência mais elevada.

3.3.2. RECOBRIMENTO MÍNIMO

A NP EN 1992-1-1 2010 define o recobrimento, como uma camada de betão cuja espessura situa-se entre a superfície do betão e a superfície da armadura mais próxima da superfície do betão. A NP EN 1992-1-1 2010 define ainda um recobrimento nominal a aplicar de acordo com a seguinte formula, que

resulta da soma do recobrimento mínimo com um recobrimento devido às tolerâncias de execução (igualmente observado no anexo B da especificação LNEC E 464 – 2007):

$$c_{\text{nom}} = c_{\text{min}} + \Delta c_{\text{dev}}$$

Apesar de a NP EN 206-1 2007 não fazer referência ao recobrimento mínimo das armaduras, a especificação do LNEC E 464 – 2007 estabelece valores para o recobrimento nominal de acordo com as classes de exposição e o tipo de cimento CEM (**Quadro 3.5** e **Quadro 3.6**), e apresenta valores para o recobrimento mínimo relativo às condições ambientais, estes últimos repetem-se no Eurocódigo 2 (**Quadro 3.11** e **Quadro 3.12**).

O recobrimento mínimo deve assegurar a transmissão das forças de aderência, a durabilidade protegendo o aço da corrosão e deve também assegurar uma determinada resistência ao fogo. O recobrimento mínimo a adotar deve ser o mínimo que satisfaça os três requisitos mencionados.

$$c_{\text{min}} = \max \{ c_{\text{min,b}}; c_{\text{min,dur}} + \Delta c_{\text{dur,y}} - c_{\text{dur,st}} - c_{\text{dur,add}}; 10 \text{ mm} \}$$

Em que:

$c_{\text{min,b}}$ recobrimento mínimo para os requisitos de aderência;

$c_{\text{min,dur}}$ recobrimento mínimo relativo às condições ambientais;

$\Delta c_{\text{dur,y}}$ margem de Segurança;

$c_{\text{dur,st}}$ redução do recobrimento mínimo no caso de utilização de aço inoxidável;

$c_{\text{dur,add}}$ redução do recobrimento mínimo no caso de proteção adicional.

3.3.3. CONTROLO DA FENDILHAÇÃO

Devido às diversas ações no betão armado como a flexão, o esforço transversal, a torção e a tração, a fendilhação é um acontecimento frequente. Contudo a fendilhação deve ser controlada e limitada de forma a não prejudicar a durabilidade, o funcionamento da estrutura e a estética. A NP EN 1992-1-1 2010 estabelece uma abertura de fendas limite w_{max} de acordo com a classe de exposição (**Quadro 3.13**), no caso de X0 e X1 serve apenas para efeitos estéticos mas para as restantes classes para prevenir a entrada de agentes nocivos.

Quadro 3.13 - Valores recomendados de w_{\max} (mm)

Classes de exposição	Elementos de betão armado e elementos de betão pré-esforçado com armaduras não aderentes	Elementos de betão pré-esforçado com armaduras aderentes
	Combinação de ações quase permanente	Combinação de ações frequente
X0, XC1	0,4 ¹	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2 ²
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3		Descompressão
¹ Para as classes de exposição X0 e XC1, a largura de fendas não tem influência sobre a durabilidade e este limite é estabelecido para dar em geral um aspeto aceitável. Na ausência de especificações no que respeita ao aspeto, este limite poderá ser reduzido. ² Para estas classes de exposição deverá verificar-se, ainda, a descompressão para a combinação quase permanente de ações.		

3.3.3.1. ARMADURAS MÍNIMAS

De forma a controlar a fendilhação, a NP EN 1992-1-1 2010 estabelece um subcapítulo propondo a inserção de armadura mínima aderente, esta armadura não necessita de impedir a fendilhação mas sim reduzi-la para os valores máximos admitidos. A armadura mínima referida pode ser calculada pela fórmula seguinte, tendo em conta a forma da secção do elemento.

$$A_{s,\min} \sigma_s = k_c k f_{ct,eff} A_{ct}$$

Em que:

$A_{s,\min}$ área mínima das armaduras para betão armado na zona tracionada;

σ_s valor absolute da tensão máxima admissível na armadura imediatamente depois da formação da fenda.

Poderá ser considerada igual à tensão de cedência da armadura. No entanto, poderá ser necessário adotar-se um valor mais baixo para satisfazer a largura máxima de fendas em função do diâmetro máximo ou do espaçamento máximo entre varões;

k_c coeficiente que tem em conta a distribuição de tensões na secção, imediatamente antes da fendilhação e da variação do braço do binário;

k coeficiente que considera o efeito das tensões não uniformes autoequilibradas, de que resulta uma redução dos esforços de coação;

$f_{ct,eff}$ Valor médio da resistência do betão à tração à data em que se prevê que se possam formar as primeiras fendas

A_{ct} área de betão tracionado. A zona de betão tracionado é aquela em que, pelo cálculo da secção, se demonstra que está em tração imediatamente antes da formação da primeira fenda;

O regulamento refere ainda como controlar a fendilhação sem cálculo direto e como calcular a largura de fendas, este último cálculo tem como objetivo verificar se a armadura adotada é suficiente para garantir os limites de abertura de fendas.

Em estruturas hiperestáticas utiliza-se armaduras mínimas para controlar a fendilhação causada pela torção, resultante da hiperestatia da estrutura 6.3.1(2).

O ponto 6.2.1(4) da NP EN 1992-1-1 2010 refere, mesmo que na verificação do esforço transversal não seja necessário colocar armadura de esforço transversal, esta deve existir nunca com diâmetro inferior à armadura mínima que deve ser prolongada até aos apoios, contudo poderá ser omitida em alguns casos.

3.3.4. ARMADURA NÃO ESTRUTURAL E CONSTRUTIVA

Apesar das armaduras terem um papel importante no betão armado com o objetivo de resistir às forças de tração existentes no elemento, estas apenas são consideradas estruturais quando não são inferiores a $A_{s,min}$ numa dada secção, caso contrário são consideradas não estruturais segundo o ponto 9.2.1.1 da NP EN 1992-1-1 2010 (2).

Quando esteja prevista a utilização de varões com diâmetro superior a 32 mm, ou agrupamento de varões com diâmetro equivalente superior a 32 mm, devem ser utilizadas armaduras de pele (consideradas armaduras construtivas) de forma a evitar o destacamento do betão segundo o Anexo J J.1 da NP EN 1992-1-1 2010. A NP EN 1992-1-1 2010 nada refere acerca de outras armaduras construtivas.

3.4. REGULAMENTO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO E PRÉ-ESFORÇADO

3.4.1. FENDILHAÇÃO

O REBAP (57) com a promulgação do RSA (58) classifica a agressividade do ambiente em três grupos, da mesma forma que o Eurocódigo 2 separa as classes de exposição como no Quadro 3.13. Esta classificação tem como interesse considerar escalões diferentes de agressividade para a armadura: ambientes pouco agressivos, moderadamente agressivos e muito agressivos. No REBAP as armaduras ordinárias são consideradas pouco sensíveis e as armaduras de pré-esforço muito sensíveis.

- Ambientes pouco agressivos: são ambientes com muito pouca humidade onde não se espera a existência de agentes corrosivos como por exemplo no interior de edifícios de habitação;
- Ambientes moderadamente agressivos: são ambientes interiores muito húmidos em que se espera a presença temporária de agentes corrosivos; ambientes exteriores sem concentração de agentes corrosivos; águas e solos não especialmente agressivos;
- Ambientes muito agressivos: são ambientes com forte concentração de agentes corrosivos, sejam estes líquidos ou solos.

No **Quadro 3.14** apresenta-se os estados limites de fendilhação presentes no REBAP. Estes diferem do Eurocódigo 2 quanto ao critério de combinações de ações em alguns casos, assim como as larguras de fendas.

Quadro 3.14 - Estados limite de fendilhação do REBAP

Ambiente	Combinações de ações	Estado limite das armaduras ordinárias	Estado limite das armaduras de pré-esforço
		Largura de fendas w (mm)	Largura de fendas w (mm)
Pouco agressivo	Frequentes	0,3	0,2
	Quase permanentes	-	Descompressão
Moderadamente agressivo	Frequentes	0,2	0,1
	Quase permanentes	-	Descompressão
Muito agressivo	Raras	0,1	0,1
	Frequentes	-	Descompressão

3.4.2. RECOBRIMENTO MÍNIMO DAS ARMADURAS

O recobrimento mínimo é com base na designação dos ambientes presentes no REBAP como referidos no capítulo anterior e a sua abordagem difere um pouco da NP EN 1992-1-1 2010. Enquanto a NP EN 1992-1-1 2010 atribui recobrimentos mínimos a diferentes classes estruturais de acordo com as classes de exposição, o REBAP atribui valores às estruturas no geral classificando em apenas três tipos de ambientes (**Quadro 3.15**).

Quadro 3.15 - Recobrimentos mínimos no REBAP

Ambiente	Armaduras ordinárias	Armaduras pré-esforço	Elementos laminares ¹	
	Recobrimento mínimo (cm)	Recobrimento mínimo (cm)	B30, B35, B40	Superior a B40
Pouco agressivos	2,0	3,0	-0,5 cm	-1,0 cm
Moderadamente agressivos	3,0	4,0		
Muito agressivos	4,0	5,0		

¹ Recobrimento nunca pode ser inferior a 1,5 cm, nem inferior ao diâmetro das armaduras ordinárias (ou ao equivalente ao agrupamento de armaduras); no caso das armaduras pós-tencionadas o recobrimento não deve ser inferior ao diâmetro das bainhas com o mínimo de 4 cm e quando em agrupamentos na horizontal o recobrimento não deve ser inferior a duas vezes o diâmetro das bainhas; nas armaduras pré-tencionadas o recobrimento não deve ser inferior a dois diâmetros das armaduras com o mínimo de 2 cm.

O REBAP refere ainda que o recobrimento das armaduras têm uma tolerância de 0,5 cm e refere também procedimentos para proteção das armaduras no caso de pré-esforço pós tencionado, através da injeção de produtos apropriados nas condutas ou nas bainhas.

3.4.3. ARMADURA MÍNIMA, NÃO ESTRUTURAL E CONSTRUTIVA

À semelhança da NP EN 1992-1-1 2010, o REBAP prevê a utilização de armadura de pele (construtiva) para evitar o destacamento do betão de recobrimento quando este tenha uma espessura superior a 5,0 cm (Art.º 79.º do REBAP).

No caso das armaduras estruturais, dependendo do elemento estrutural, estas situam-se entre um mínimo e máximo estabelecido, em função da secção de betão armado.

4

CASOS DIVERSOS

Como foi referido anteriormente são inúmeras as causas que podem afetar os elementos de betão armado provocando ou acelerando a corrosão das armaduras. Seguidamente apresentam-se 8 casos não estruturais e 2 casos estruturais de anomalias, relacionadas com a corrosão das armaduras afetando-as diretamente e/ou indiretamente. Analisa-se ainda a necessidade da existência das armaduras para cada caso assim como uma possível explicação de cada anomalia associada a cada caso.

4.1. CASO NÃO ESTRUTURAL 1

Uma das contribuições para a corrosão das armaduras devem-se à forma como é feita a cofragem do elemento de betão armado. Como foi evidenciado em algumas obras, algumas cofragens são elaboradas com deficiências devido à fraca disponibilidade de recursos e aproveitamento do material existente, onde após algum tempo começam os problemas com a corrosão das armaduras (Figura 4.1 e Figura 4.2). Todos os trabalhos relativamente á execução de estruturas em betão devem ser executados de acordo com a norma portuguesa NP ENV 13670-1 2007 (59). Quando o material de escoramento é inexistente, por vezes procuram outros meios (neste caso através da colocação de um varão transversão para ancorar um painel de cofragem ao outro) de forma que a cofragem se mantenha em posição durante a betonagem e a cura do betão.



Figura 4.1 – Resultado de uma deficiente cofragem



Figura 4.2 – Posicionamento do elemento estrutural no ambiente

Como podemos observar na mesma figura, o elemento de betão que separa a praia de um passeio pedonal, possui varões de aço circulares perpendiculares ao comprimento do elemento com espaçamentos idênticos. Tal elemento não necessita de tais varões a nível estrutural, desta forma apenas contribui para a degradação pelo que o aço está em contato direto com o exterior constituindo assim uma ponte para a entrada dos agentes de corrosão.

A Figura 4.3 representa uma esquematização da possível cofragem do elemento de betão apresentado na Figura 4.1. Após a colocação da armadura os varões de pequena dimensão (comprimento) que não são aproveitados como armadura, são utilizados como escoras/tirantes no interior do betão como indica a figura, evita o transporte de outras escoras para o local e facilita a limpeza dos materiais restantes após a conclusão da obra, apesar de tornar o custo ligeiramente menos dispendioso da obra este procedimento é incorreto porque trará problemas futuros com custos de reparação elevados.

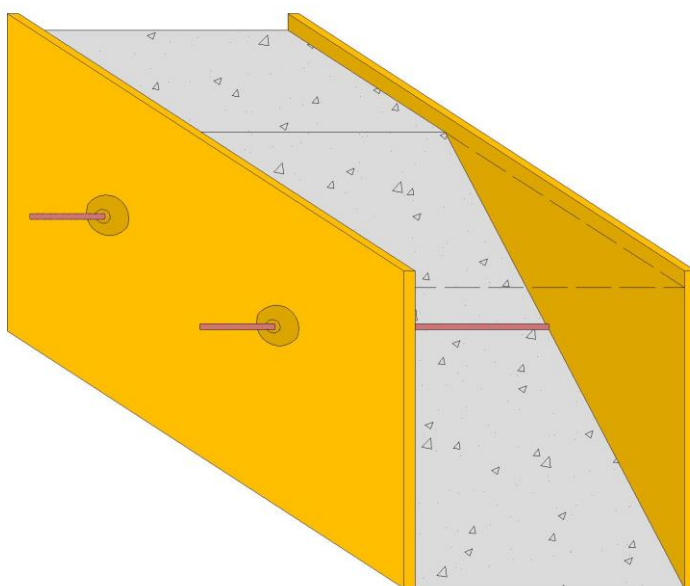


Figura 4.3 – Esquematização de uma cofragem incorreta escorando a cofragem do elemento de betão pelo interior

A anomalia da Figura 4.4 pertence à estrutura da Figura 4.1 e apresenta deficiências de posicionamento das armaduras do elemento estrutural.



Figura 4.4 – Mau posicionamento das armaduras

Como podemos ver na Figura 4.5, que representa um esquema da Figura 4.4, o terceiro varão da esquerda para a direita da fila de baixo está ligeiramente deslocado onde a espessura de recobrimento é inferior aos restantes varões. Resulta numa corrosão prematura do referido varão devido à sua maior proximidade com o exterior. Tal pode ter a ver com uma má fixação dos varões ou ausência de espaçadores, representa outro defeito de conceção que poderia ser evitado.

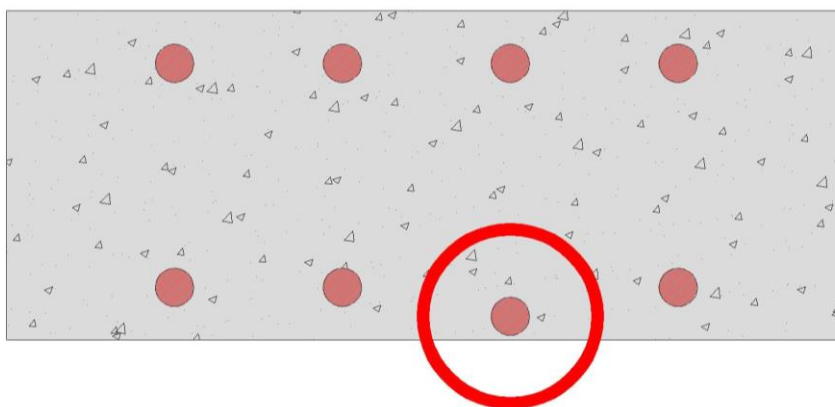


Figura 4.5 – Esquemática do mau posicionamento das armaduras

Contudo, uma vez que o elemento de betão armado situa-se entre a praia e o passeio, ficando livre de forças provocadas pelo mar devido à sua distância, poderia possivelmente ser construído em betão

simples ou em ciclópico. Apesar de existirem armaduras no elemento de betão, estas estão livres de esforços, se não existissem armaduras evitava-se a degradação do betão causada pela corrosão das mesmas.

Na Figura 4.6 podemos observar que a parte superior do elemento de betão destacou-se do mesmo, nota-se que a parte superior é um elemento pré-fabricado e foi apenas colocado em cima do elemento inferior. Após a betonagem do elemento inferior dá ideia que os varões foram cortados com uma rebarbadora, para que a superfície ficasse plana para colocação do elemento superior. A peça superior à direita na imagem é apenas metade da original, ao observarmos o seu interior não possui armaduras, dada a sua espessura poderia ter sido betonada em simultâneo com a peça inferior constituindo uma só peça.

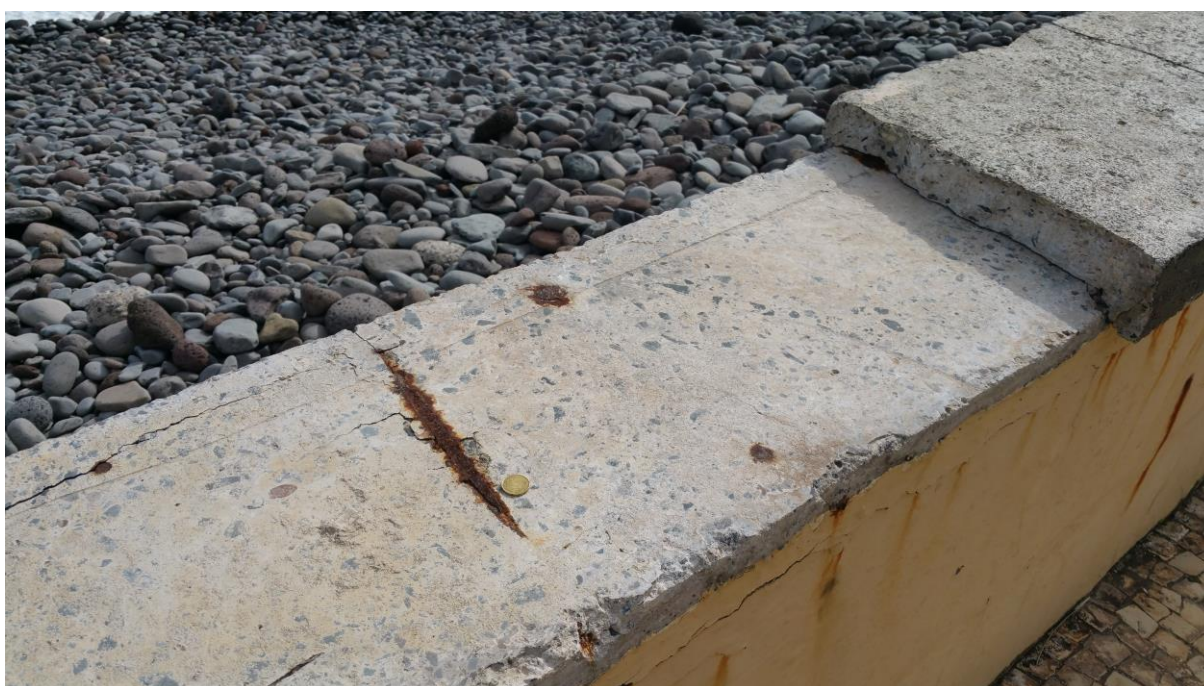


Figura 4.6 – Elemento de betão pré-fabricado destruído

Na Figura 4.7 representa a esquematização das duas peças, pelo facto de a peça superior ter sido colocada ou betonada em cima da peça inferior sem a colocação de armaduras, faz com que com as vibrações do mar existam forças como indica a figura causando o desgaste das peças e facilitando a sua deterioração.

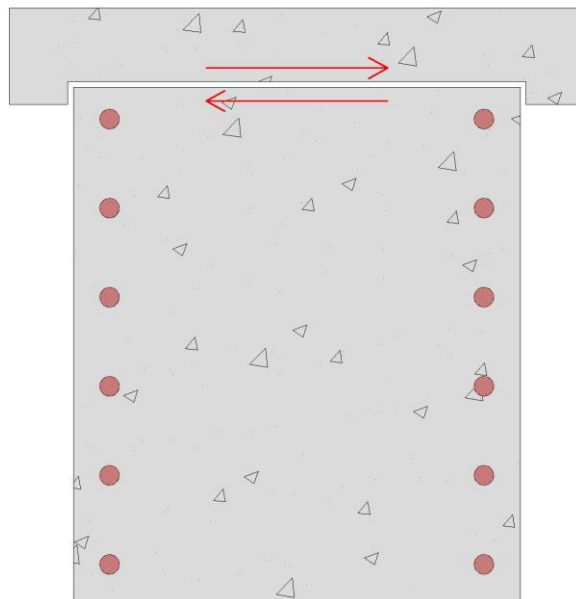


Figura 4.7 – Esquemática e posicionamento dos elementos de betão

Como consequência da exposição da peça inferior, as armaduras que foram rebarbadas à face estão agora expostas ao ambiente e aos agentes agressores, o processo de corrosão é acelerado.

A Figura 4.8 representa um elemento de betão armado semelhante ao anterior mas com construção diferente.



Figura 4.8 – Degradação acelerada de uma peça de betão armado

As peças degradadas da Figura 4.8 e Figura 4.9 foram construídas para substituir outras peças que foram destruídas pelo mar. Podemos ver na Figura 4.9 que as peças à direita em cima do muro, apesar de mais antigas, estão em bom estado. Podemos ainda observar na peça de betão armado, que uma camada superficial do betão muito fina destacou-se e expôs uma quantidade elevada de agregados com tamanho superior ao esperado o que pode conduzir a uma perda de resistência do elemento devido às suas dimensões. Observa-se desta forma que o betão é de qualidade pobre, fator que foi decisivo na sua degradação prematura, conduzindo os agentes agressores rapidamente às armaduras corroendo-as. Como nas peças que analisou-se anteriormente, estas não precisavam da armadura, e o fato de a mesma existir conduziu á degradação da peça.



Figura 4.9 – Degradação acelerada de uma peça de betão armado

A degradação é claramente acentuada junto às armaduras. Em algumas zonas do elemento a armadura deixou de existir devido à elevada corrosão (Figura 4.10), contudo apesar da degradação do betão provocada pela corrosão, a peça mantém-se intacta, o que poderia ter levado à dispensa da armadura existente, evitando assim a sua degradação.



Figura 4.10 – Armaduras de uma peça de betão armado em degradação acelerada

Em análises de algumas peças abordadas neste caso, observa-se destacamento e delaminação do betão. A Figura 4.11 apresenta um esquema do avistado, à esquerda representa a delaminação do betão por partes e à direita o destacamento e erosão do betão. Em ambos os casos deve-se à corrosão das armaduras, devido às suas forças criadas pela sua expansão, mas a qualidade do betão e o espaçamento das armaduras irão influenciar na forma da degradação do betão. Quanto menor for o espaçamento das armaduras mais facilmente ocorrerá a delaminação, e quando mais pobre for a qualidade do betão mais fácil ocorrerá o destacamento e a erosão do mesmo. Em alguns casos observou-se também uma irregularidade nos espaçamentos das armaduras devido à falta de rigor na sua colocação, tal originou delaminação, destacamento e erosão do betão em simultâneo na mesma peça de betão armado.

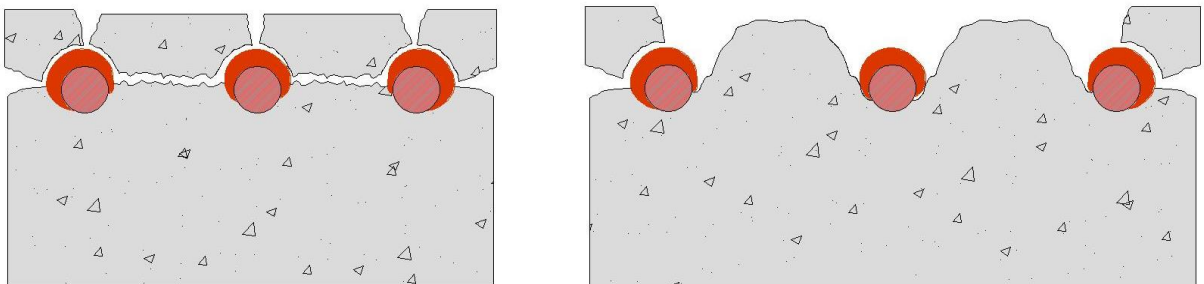


Figura 4.11 – Esquemática das formas de degradação do recobrimento

4.2. CASO NÃO ESTRUTURAL 2

Como já presenciou-se anteriormente, a exposição da armadura do betão armado ao meio ambiente é o problema que contribui mais rapidamente para a degradação do betão devido à corrosão das armaduras. A Figura 4.12 corresponde à fixação de uma varanda a uma placa de betão armado junto ao mar, pelo facto de a varanda conter ferro assim como os suportes de fixação estes deveriam levar um tratamento especial ou serem substituído por aço inoxidável. A falta desse tratamento conduziu à corrosão, esta corrosão foi ainda mais acelerada em superfícies horizontais devido à permanência da água como podemos ver na figura, no mesmo local onde estão os parafusos de fixação. Pelo facto de os elementos de fixação serem parafusos possibilita a entrada da água mais rapidamente junto à superfície do mesmo, aumentando a velocidade de penetração dos cloretos no betão, e consequentemente chegando mais rápido às armaduras do tabuleiro de betão armado.



Figura 4.12 – Suporte de fixação de uma varanda junto ao mar

Outro sistema utilizado numa varanda semelhante foi a inserção de varões na betonagem do tabuleiro de betão, com o objetivo de soldar a varanda aos varões (Figura 4.13). Tem o mesmo efeito de degradação do betão armado que o sistema anterior, e poderá conduzir os cloretos mais rapidamente às armaduras estruturais do tabuleiro dependendo da dimensão dos varões de fixação da varanda.



Figura 4.13 – Soldadura da varanda aos varões existentes no betão armado pelo exterior do mesmo

Na Figura 4.14 apresenta-se uma esquematização das fixações das varandas abordadas onde se pode compreender a profundidade dos varões face aos parafusos.

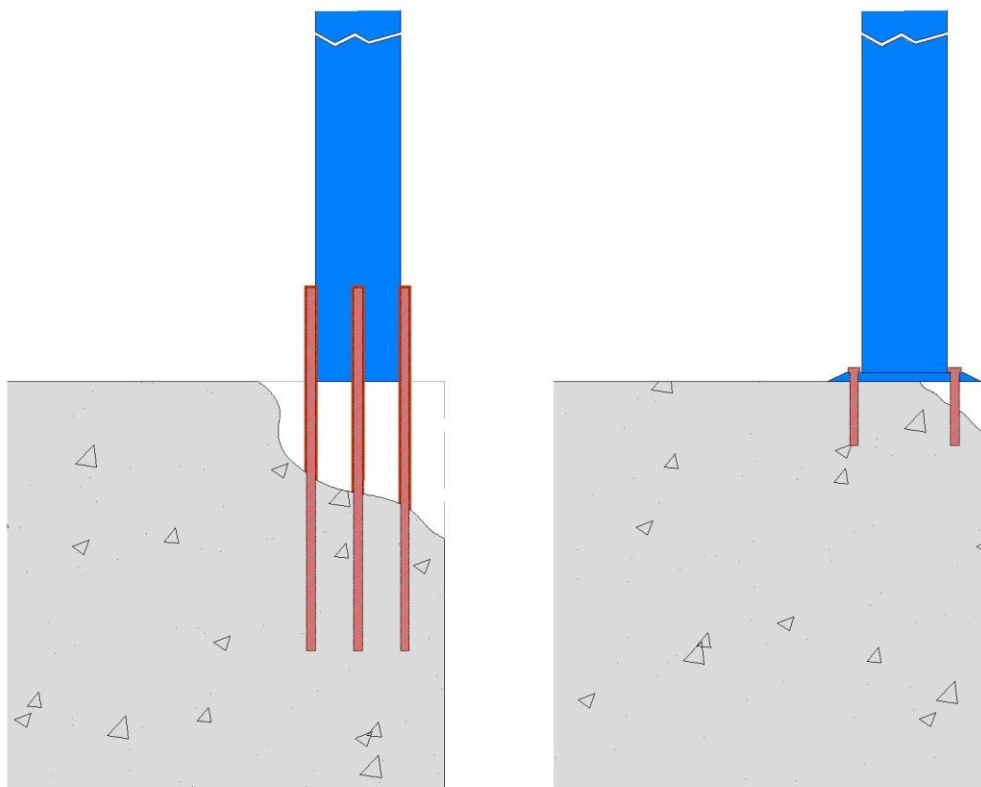


Figura 4.14 – Esquematização dos sistemas de fixação das varandas abordados

Apesar de estas armaduras terem o funcionamento de fixadores da varanda, degradaram o betão pois estavam embidas nele e não tinham qualquer tratamento. Apesar de atualmente a montagem estar corroída e esteticamente desagradável, conclui-se que todo o sistema foi montado por pessoal não qualificado, até porque a varanda foi soldada aos varões embebidos no betão. Todas as peças expostas deveriam ter uma manutenção regular de forma a preservá-las aumentando assim o seu tempo de vida.

4.3. CASO NÃO ESTRUTURAL 3

A Figura 4.15 identifica a corrosão num muro de betão armado para contenção de um talude. Todo o recobrimento horizontal está delaminado e as armaduras longitudinais nesse recobrimento encontram-se soltas e em estado avançado de corrosão. Pode-se também observar que a corrosão foi transmitida aos restantes varões onde torna-se evidente que a degradação do betão ocorre apenas devido às forças de expansão das armaduras corroídas.



Figura 4.15 – Muro de suporte de um talude

As armaduras expostas devido à corrosão, não têm funcionalidade estrutural uma vez que estão libertas do betão nem possuem esforços, contudo o muro continua funcional, sem qualquer sinal de rotura com a exceção do betão degradado pelas armaduras. Na Figura 4.16 podemos visualizar que a altura do muro anda entre 1,5 e 2,0 m, dito isto o muro poderia ser em betão ciclópico sem que o valor global da construção do mesmo tivesse grandes alterações, até porque o muro pertence ao aeroporto Internacional da Madeira, zona em que a estética é de alta relevância.



Figura 4.16 – Muro de suporte de um talude

A Figura 4.17 representa uma esquematização em corte do referido muro. As armaduras que sobem pelo muro à direita voltam a descer pela esquerda para resistir às forças impostas pelo suporte das redes, as armaduras longitudinais no topo do muro também têm a mesma funcionalidade. Uma vez que a rede não tem esforços pelo vento nem possui cargas verticais, torna-se desnecessárias as armaduras no muro na parte superior. Essas armaduras degradaram o betão e ficaram completamente soltas do betão, contudo a estrutura mantém-se de pé. Caso se quisesse contabilizar as forças impostas pelo trespasses de intrusos, poder-se-ia ter considerado um muro em betão ciclópico dispensando quaisquer armaduras e aumentava-se a profundidade dos suportes.

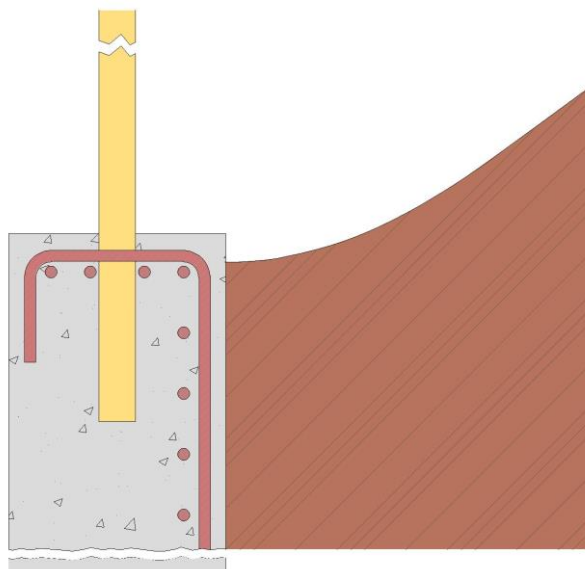


Figura 4.17 – Esquemática do muro de suporte de um talude

4.4. CASO NÃO ESTRUTURAL 4

Na Figura 4.18 apresenta-se um muro com argamassa na parte superior. A argamassa aparenta ter armaduras no seu interior para evitar a fendilhação por retração.



Figura 4.18 – Recobrimento de um muro

O posicionamento das armaduras observado na argamassa não é o mais correto, estas aparentam estar muito próximas ao muro, o qual foi construído antes da aplicação da argamassa. Sendo a argamassa

muito porosa, facilitou a entrada de agentes agressores à armadura corroendo-a. As armaduras ao entrarem no estado de corrosão expandiram-se e acabaram por fendilhar a argamassa. O resultado foi o destacando de grandes peças devido ao mau posicionamento das armaduras, à fraca resistência mecânica da argamassa e à grande porosidade da mesma.



Figura 4.19 – Fendilhação do recobrimento em todo o muro

Através da Figura 4.19 podemos concluir que o posicionamento das armaduras fez com que toda a peça de argamassa em cima do muro separa-se do mesmo, ocorrendo a delaminação e destacamento, tal confirma-se devido à fendilhação existente na zona das armaduras corroídas.

A Figura 4.20 indica o corte do muro junto à zona da argamassa em cima do muro, o resultado da separação física entre os dois elementos é evidente devido ao mau posicionamento das armaduras assim como a má aderência entre os mesmos.

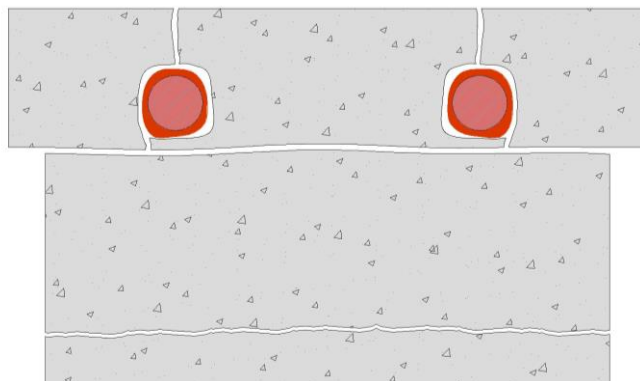


Figura 4.20 – Corte esquemático do recobrimento existente no muro após corrosão das armaduras

A peça em argamassa é desnecessária, esta poderia ter sido betonada juntamente com o muro não sendo necessário o recurso às armaduras para controlo da fendilhação, assim evitar-se-ia a degradação.

A Figura 4.21 Trata-se de um caso semelhante ao anterior, podemos observar que as armaduras estão tão baixas na argamassa que tornam-se inúteis em impedir a retração.



Figura 4.21 – Betonagem em cima de parede

Na Figura 4.22 representa-se um corte da zona em análise, além da espessura em excesso de recobrimento o varão exterior foi colocado junto à cofragem dificultando o acesso da argamassa a todos os vazios, a armadura ficou exposta sem recobrimento, o que leva ao início imediato do processo de corrosão.

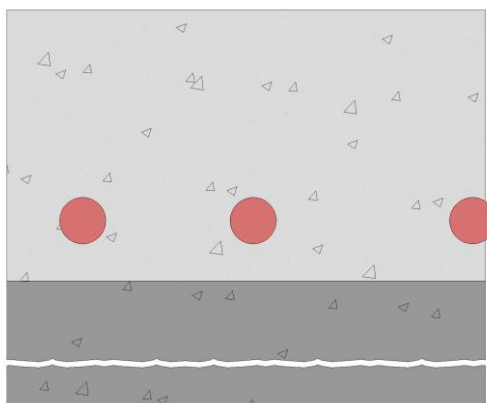


Figura 4.22 – Esquema em corte da Figura 4.21

Apesar da porosidade da argamassa acelerar a corrosão, as aberturas das fendas pela retração irá aumentar a velocidade de penetração de agentes agressores às restantes armaduras no interior do betão.

4.5. CASO NÃO ESTRUTURAL 5

Na Figura 4.23 apresenta-se uma varanda com as armaduras expostas no corrimão, toda a parte inferior do corrimão encontra-se fendilhada incluindo o suporte à direita na figura.



Figura 4.23 – Fendilhação numa varanda devido à corrosão

As armaduras são para impedir a retração e oferecer resistência à varanda quando aplicadas forças devido ao encosto dos utilizadores, pelo facto de a faixa superior ter os varões junto aos balaustres fez

que a toda a faixa subisse devido à corrosão das armaduras, uma vez que as forças resistentes entre a faixa e os balaustres foram inferiores aos esforços criados pelas armaduras (Figura 4.24).

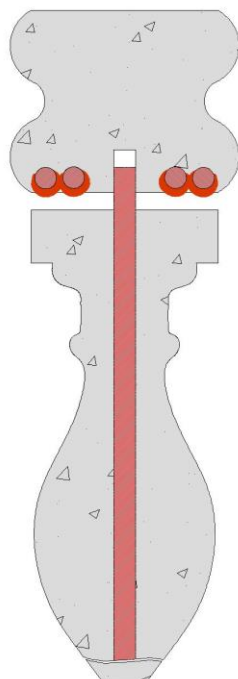


Figura 4.24 – Esquema em corte da varanda degradada devido à corrosão das armaduras

A colocação de dois varões juntos para impedir a retração não é a mais indicada devido à corrosão dos mesmos, se tivermos em conta a mesma área dos dois varões utilizados em apenas um varão, chega-se à conclusão que o perímetro dos dois varões é superior ao perímetro de apenas um, o que resulta numa maior superfície de armaduras sujeitas à corrosão. Uma maior superfície significa num aumento maior de volume dos varões no interior da argamassa. Apesar de a armadura ser necessária devido às peças serem muito esbeltas e para evitar a retração, nota-se um excesso de armaduras. Normalmente, o corrimão apresenta apenas um varão no centro devido às necessidades que abordou-se anteriormente como para facilitar a ligação com o balaústre, assim como a sua posição é crucial porque protege ao máximo dos agentes agressores.

Na mesma varanda, notou-se que a varanda ao chegar a um suporte com maior resistência que o referido anteriormente a fendilhação desviou-se para a parte superior do corrimão (Figura 4.25). Nos dois balaustres mais próximos do suporte ainda nota-se um pequeno destacamento entre os mesmos e o corrimão mas não tão espaçados como os restantes. Tal acontecimento tem como possível explicação o facto de existir um maior momento resistente junto ao suporte que impede que o corrimão se mova de acordo com as forças criadas pelas armaduras corroídas na face inferior do corrimão.



Figura 4.25 – Desvio de uma fenda num corrimão

Na Figura 4.26 apresenta-se um corte da zona da varanda com o desvio da fendilhação, como podemos observar, devido ao momento resistente no suporte e à pequena esbelteza da parte direita à fenda do corrimão, as armaduras possuirão um pequeno desvio na zona da fenda ou simplesmente deu-se a perda da aderência total das armaduras elevando todo o corrimão com a exceção da zona mais próxima ao suporte.

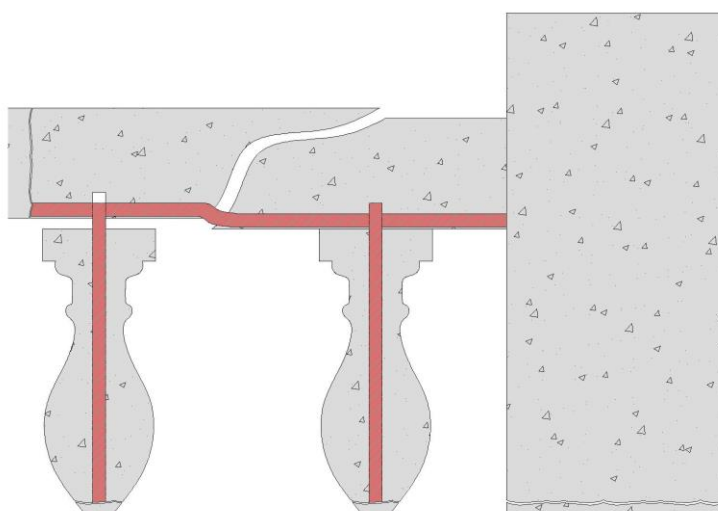


Figura 4.26 – Esquema aproximado do corte da varanda com o desvio da fendilhação

Ainda na mesma varanda temos um exemplo de uma resistência superior dos balaústres junto ao corrimão do que junto à sua base (Figura 4.27) (os dois à esquerda do suporte do corrimão). Em vez de ocorrer a fendilhação entre o balaústre e o corrimão, todo o elemento subiu de posição e a fendilhação

deu-se na base, tal acontecimento pode ter a contribuição de um varão no balaústre mais comprido que os restantes e as armaduras no corrimão poderão ter um pequeno possível desvio colocando-as assim ligeiramente mais próximas do centro do corrimão.



Figura 4.27 – Fendilhação do suporte do corrimão e da base dos balaústres

A força causada pela corrosão das armaduras no corrimão foi tão elevada que causou a fendilhação no elemento de fixação (Figura 4.28), deixando uma abertura à entrada dos agentes agressores às armaduras do elemento. Tal acontecimento poderá ter ocorrido devido à inexistência de armaduras no elemento de fixação, ou à insuficiência das mesmas.

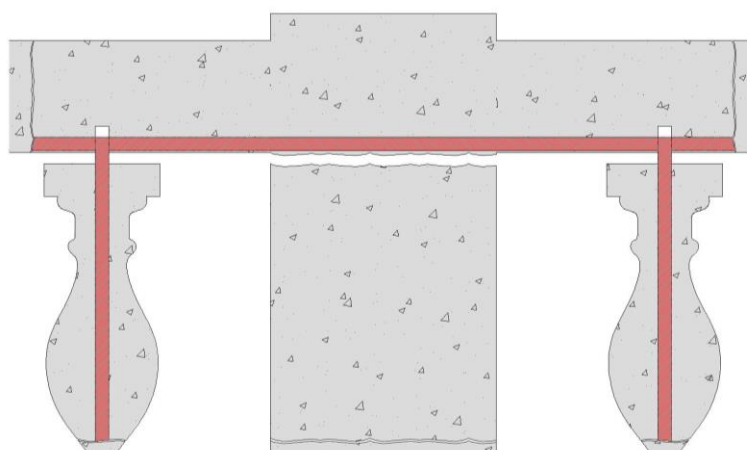


Figura 4.28 – Esquema em corte da fendilhação do suporte dos corrimões

Analisou-se outra varanda com balaústres mais esbeltos onde ocorreu o problema da fendilhação dos mesmos (Figura 4.29).



Figura 4.29 – Fendilhação e descolamento do betão em balaústres

O varão existente no balaústre tem como finalidade fixar o mesmo às extremidades e impedir a quebra da peça devido à sua esbelteza. A esbelteza é tal que o recobrimento tornasse insuficiente para evitar a corrosão do varão durante períodos longo logo a mesma é prematura. Devido à corrosão, todo o betão fendilha-se e acaba por destacar-se do elemento (Figura 4.30). Devido às dimensões do elemento, o mesmo torna-se muito sensível ao ambiente onde até a mudança de temperatura ambiental pode ser um fator contributivo para a fendilhação do betão.

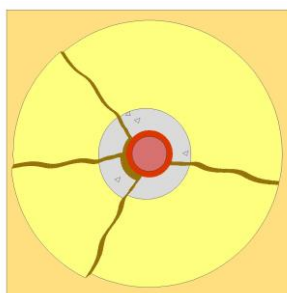


Figura 4.30 – Esquema em corte da fendilhação de um balaústre

Em ambas varandas estudadas, a entrada de agentes agressores foi facilitada devido às mesmas terem sido construídas em argamassa com alta porosidade, contudo considerou-se alguns problemas em que a razão foi a introdução das armaduras indevidas que provocaram a degradação dos elementos.

4.6. CASO NÃO ESTRUTURAL 6

A Figura 4.31 representa parte de uma estrutura que separa uma praia de calhau de um passeio, a estrutura tem a função de varanda e ao mesmo tempo de banco. Toda a estrutura apresenta graves problemas de degradação devido à corrosão das armaduras, onde em alguns casos foi colocado betão novo em zonas onde o recobrimento tinha caído.



Figura 4.31 – Reparação de betão armado mal efetuada

Contudo apesar da intuição, o processo não foi efetuado corretamente uma vez que verifica-se fendilhação no novo betão (Figura 4.32), tal deve-se ao fato de as armaduras não terem sido verificadas antes da aplicação do novo betão. Um correto procedimento deveria ser remover todo o aço corroído e em caso de extrema corrosão substituir os varões corroídos. Igualmente deve ser dada atenção ao betão presente na estrutura pois devido à corrosão das estruturas, o betão envolvente encontrar-se-á carbonatado e com índice elevado em cloretos logo todo o betão com esses sintomas deverá também ser substituído.

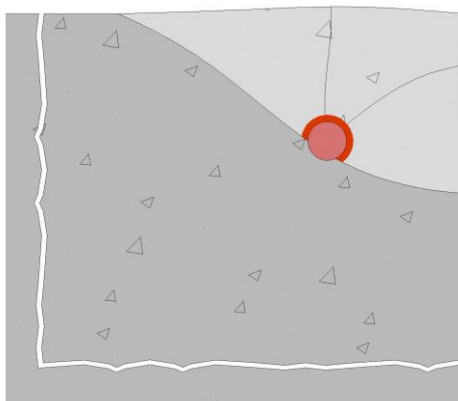


Figura 4.32 – Esquema do betão novo sobre o antigo com as armaduras corroidas

Em alguns casos a armadura está exposta (Figura 4.33), tanto os varões longitudinais como os transversais, mas os longitudinais revelam que a degradação do betão tende a acompanhá-los, visto estas estarem com maior exposição nas laterais. Esta degradação ocorre primeiramente nas laterais porque os varões longitudinais das laterais possuem duas frentes de ataque, a este efeito denomina-se de efeito de canto e está presente também nos pilares como mostra a Figura 4.34.



Figura 4.33 – Orientação principal da degradação

Ao analisar mais ao pormenor, observamos que o tamanho dos agregados é muito variável, assim como alguns são de dimensões muito superiores ao aconselhado (Figura 4.34) o que diminui drasticamente a resistência da massa entre os agregados. Notou-se também que apesar de a superfície do elemento quando não está em estado degradado é muito lisa, mas com uma pequena erosão repara-se que tem uma porosidade elevada, o que favorece a entrada dos cloretos com maiores velocidades.



Figura 4.34 – Dimensão de alguns agregados superiores ao recomendável

A peça como indica a Figura 4.35 foi betonada como uma peça única, isto faz com que a fendilhação, a e degradação do betão assim como a corrosão das armaduras se transmita a toda a peça. Observa-se também que a peça possui armadura contínua em toda a peça ignorando o comportamento estrutural da mesma, na falta de conhecimento garante a segurança mas do ponto de vista da degradação favorece-a, porque ocorrerá a corrosão em armaduras em zonas que não se precisava de armadura e seguidamente degradação do betão.



Figura 4.35 – Estado avançado de degradação do elemento de betão armado

Na Figura 4.36 observa-se claramente que a degradação do betão armado no elemento, tem forte influência na qualidade do betão e seus agregados, causou grandes problemas na betonagem no que diz respeito ao preenchimento do índice dos vazios como na distribuição dos agregados, divergindo assim da homogeneidade do betão.



Figura 4.36 – Heterogeneidade do betão no elemento estrutural

No dimensionamento do elemento estrutural temos o seu peso próprio e cerca de 3 pessoas para o seu dimensionamento. Dito isto, que o elemento está simplesmente apoiado com 1,50 m entre os apoios, e que o elemento tem uma espessura elevada, as armaduras poderiam ter sido dispensadas evitando assim a degradação do elemento. Até porque grande parte das armaduras existentes têm a sua armadura reduzida a menos de 30% da secção inicial, o que mesmo assim não foi razão para o colapso dos elementos.

4.7. CASO NÃO ESTRUTURAL 7

Na Figura 4.37 apresenta-se um edifício com alguns sinais de degradação, mais concretamente as varandas. Nestas a degradação foi causada pela corrosão das armaduras, as quais eram desnecessárias porque não apresentam esforços de forma a recorrer ao betão armado na sua construção. O referido edifício foi reabilitado e as varandas apresentadas em betão armado foram substituídas por varandas em vidro sem qualquer suporte estrutural auxiliar.



Figura 4.37 – Edifício em degradação

4.8. CASO NÃO ESTRUTURAL 8

Um caso particular observado em algumas habitações é a fendilhação nas churrasqueiras em betão armado (Figura 4.38). Como indica a imagem, toda a estrutura encontra-se sem qualquer sinal de degradação com a exceção da base cujo material é diferente de todo o resto.



Figura 4.38 – Churrasqueira familiar fendilhada

A Figura 4.38 mostra a anomalia ao pormenor onde verifica-se a fendilhação em toda a peça. Tal fendilhação terá influência com a utilização de um betão inadequado à alta temperatura a que o elemento está sujeito assim como às variações de temperatura repentinas, visto que é hábito apagar as brasas com água após a sua utilização.



Figura 4.39 – Fendilhação ao pormenor na churrasqueira

No caso da existência de armaduras no elemento, não só as altas temperaturas contribuem para uma corrosão acelerada como as fendas criadas facilitaram a entrada dos agentes agressores, o que causará uma degradação do betão mais acentuada. A única força que o elemento está sujeito é à tração devido às elevadas temperaturas da fogueira, esta tração é muito pequena devido a pequena dimensão do elemento e é impedida pelos seus elementos verticais adjacentes. Desta forma as armaduras poderiam ser dispensadas evitando assim a degradação do betão.

4.9. CASO ESTRUTURAL 1

Na Figura 4.42 está identificado parte de um tabuleiro em betão armado de uma ponte/cais pedonal sobre o mar, como o apresentado na Figura 4.12, uma vez que trata-se de uma laje estamos na presença de uma estrutura de betão armado em vez de um elemento de betão armado. A armadura exposta não tem qualquer resistência e nota-se no seu seguimento uma fenda entre 5 e 10 mm de espessura, onde especula-se que tal armadura esteja também numa fase avançada de corrosão. Junto ao varão longitudinal podemos ainda observar parte de um varão transversal que julga-se estar indevidamente posicionado face ao recobrimento.

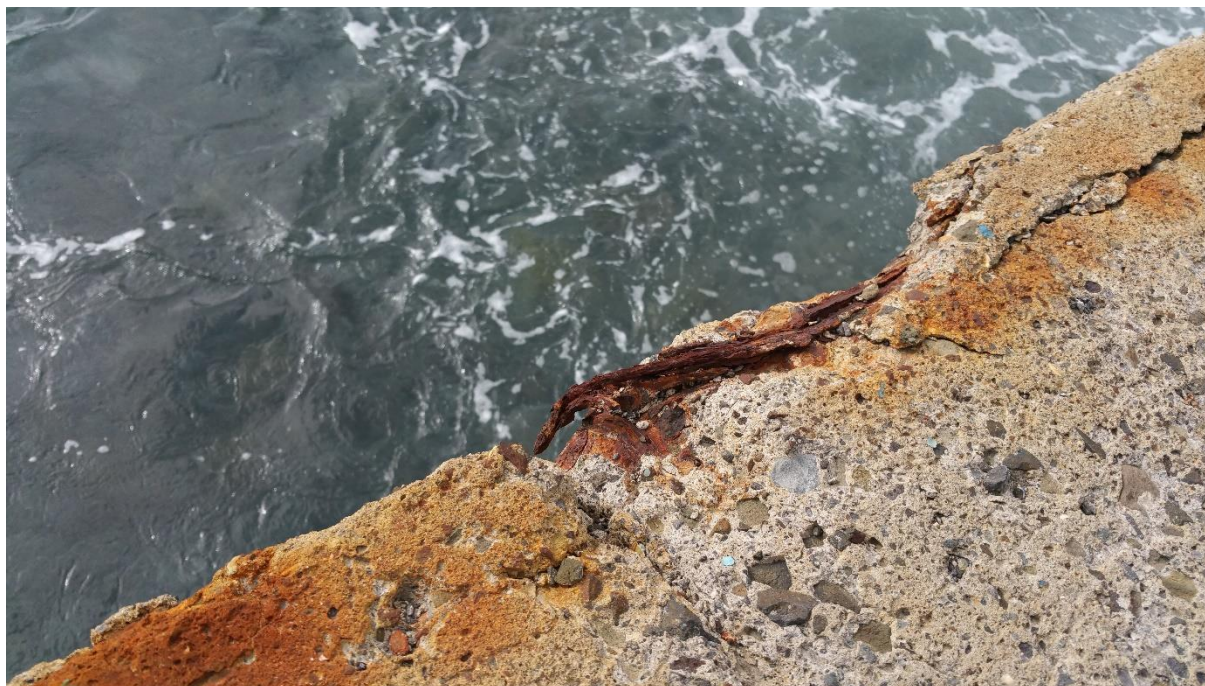


Figura 4.40 – Má colocação das armaduras numa laje junto ao mar

A Figura 4.41 representa uma esquematização aproximada do problema identificado na Figura 4.40, na figura identifica-se uma linha fictícia, vermelha e tracejada que representa o limite as armaduras podem alcançar de forma a garantir uma espessura suficiente de recobrimento. A armadura longitudinal está claramente mal fixa com uma ligeira curvatura para dentro da espessura do recobrimento assim como alguns varões transversais. À medida que os cloretos se penetram, irão alcançar tais armaduras antecipadamente ao pretendido causando a degradação prematura do elemento estrutural.

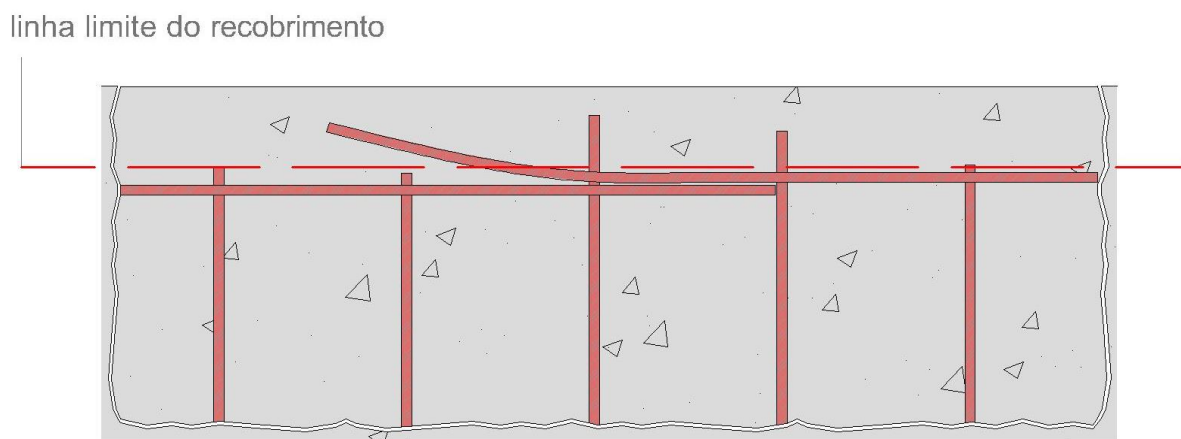


Figura 4.41 – Esquematização da colocação das armaduras apresentado na Figura 4.40

Tal problema observou-se noutras posições do elemento estrutural como mostra a Figura 4.42, a gravidade em alguns casos foi tal que as armaduras desapareceram devido à corrosão. Apesar da inexistência das armaduras a estrutura mantém-se funcional, o que levanta a questão se essas armaduras

são necessárias ou pelo menos parte das mesmas seriam necessárias. A impressibilidade das ondas do mar tornará determinadas armaduras indispensáveis, mas como referimos anteriormente estas poderiam ser substituídas por outro material alternativo devido à forte presença do mar no elemento estrutural em análise.



Figura 4.42 – Má colocação das armaduras numa laje junto ao mar

É de referir que apesar de o recobrimento ser insuficiente em alguns varões deduz-se que o tipo de betão também possa também ser o incorreto, devido à elevada quantidade de varões em corrosão na estrutura tendo em conta o tempo de vida da mesma (entre 10 a 15 anos).

Na Figura 4.43 identifica-se outro problema de corrosão das armaduras numa ponte pedonal junto ao mar semelhante à anterior, a corrosão situa-se ao longo da peça com maior gravidade entre os pilares, mais concretamente na zona tracionada.



Figura 4.43 – Corrosão das armaduras numa zona tracionada de um tabuleiro numa ponte

Os pilares não apresentam qualquer corrosão das armaduras e foram construídos na mesma altura que os restantes elementos, os mesmos poderão ser apenas betão o que é pouco provável, ou o betão armado dos pilares poderá ter a qualidade adequada ao contrário do resto estrutura.

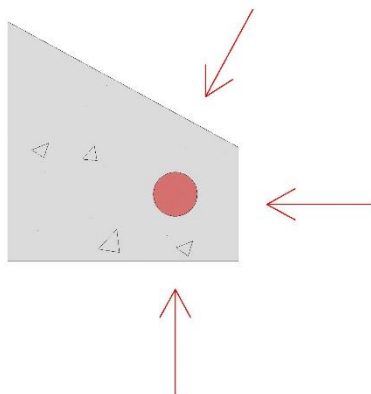


Figura 4.44 – Esquematização do recobrimento e frentes de ataque do

A Figura 4.44 representa uma esquematização do recobrimento da armadura mencionada, podemos ver claramente que o varão possui três frentes de ataque que resulta na aceleração do processo de corrosão. A armadura é estrutural visto a mesma possuir diâmetro significativo e apresentar-se numa zona tracionada, contudo a mesma desapareceu e a estrutura mantém-se intacta, isto possivelmente pelo fato de a estrutura estar sobredimensionada como instrui os regulamentos.

A Figura 4.45 corresponde à parte lateral exterior de uma ponte pedonal sobre o mar.



Figura 4.45 – Parte exterior de uma ponte sobre o mar

Na mesma figura mostra uma armadura totalmente corroída na zona de compressão da ponte caso as vigas tenham sido betonadas em conjuntamente com o tabuleiro, sendo uma zona de compressão esta armadura poderia ter sido excluída uma vez que não suporta quaisquer esforços.



Figura 4.46 – Parte interior de uma ponte sobre o mar

Entre as duas vigas como indica a Figura 4.46 o mesmo se sucede com as armaduras existentes. Na Figura 4.47 indica-se uma esquematização em corte da ponte onde apresenta-se o tabuleiro, as vigas, o pilar e as armaduras em causa, no caso de uma betonagem separada entre as vigas e o tabuleiro. Neste caso, visto que as armaduras encontram-se na parte inferior do tabuleiro e entre os pilhars, estas estão em tração. Ao estarem mais afastadas da linha neutra do tabuleiro do que qualquer outra armadura nele existente, faz com que o seu braço seja maior assim como o momento solicitado. Como existem apenas 4 varões a sua extensão pode ter sido tal que provocou a fendilhação no betão à sua volta, visto a sua seção também ser muito reduzida. Apesar de estes varões existirem de forma a impedir o movimento do tabuleiro em cima das vigas como forma de armadura resistente, estes deveriam ser transversais e não longitudinais, ficando desta forma inutilizados estruturalmente até porque foram totalmente corroídos.

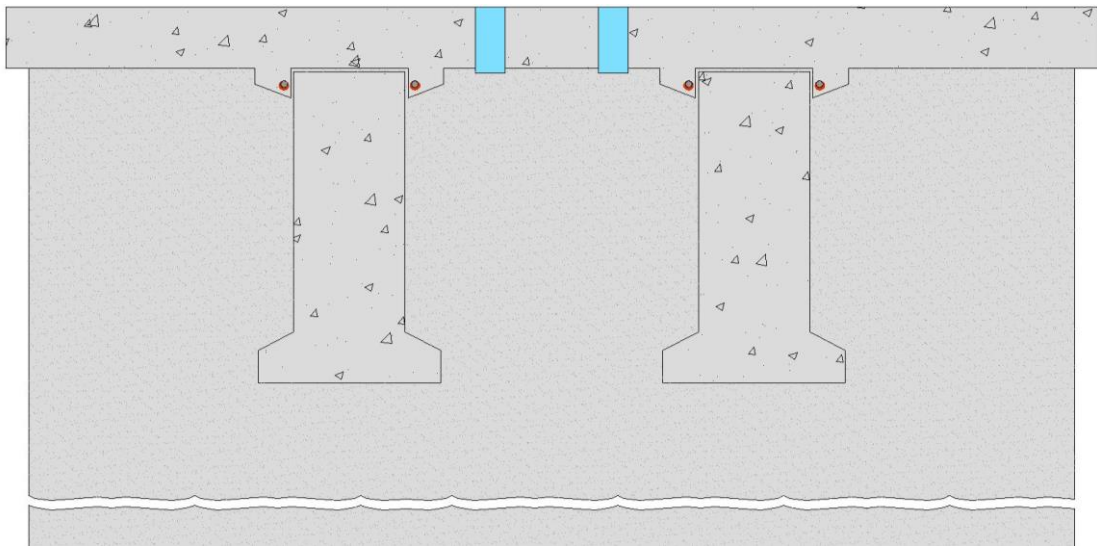


Figura 4.47 – Corte da ponte das figuras anteriores com as armaduras em análise

4.10. CASO ESTRUTURAL 2

O caso que se segue é o mais complexo desta dissertação do ponto de vista estrutural e estético, devido à elevada degradação e da forma da estrutura. Trata-se de uma ponte rodoviária com quatro faixas de rodagem onde entre a estrutura e as faixas encontra-se aterro, a ponte tem forma irregular assim como todos os seus elementos estruturais dificultando o rigor do seu dimensionamento (Figura 4.48).



Figura 4.48 – Ponte rodoviária junto ao Aeroporto da Madeira

Devido à proximidade com o mar, a estrutura está constantemente em contato com cloretos provenientes de sais marinhos transportados pelo mar ficando esta sem contato direto com a água do mar. Contudo à cerca de 5 anos atrás o mar incidiu violentamente sobre a estrutura devido a um temporal aumentando drasticamente a concentração de cloretos na estrutura e danificando-a através da projeção de rochas pelas ondas (Figura 4.49).



Figura 4.49 – Degradação dos pilares e da laje de suporte do aterro

Desde essa altura a estrutura têm-se degradado com o passar do tempo devido à corrosão das armaduras corroendo todos os elementos da estrutura com especial concentração nos pilares (Figura 4.50).



Figura 4.50 – Degradação dos pilares

A corrosão das armaduras foi elevada de tal forma que algumas deixaram de existir tanto as armaduras longitudinais como os estribos (Figura 4.51).

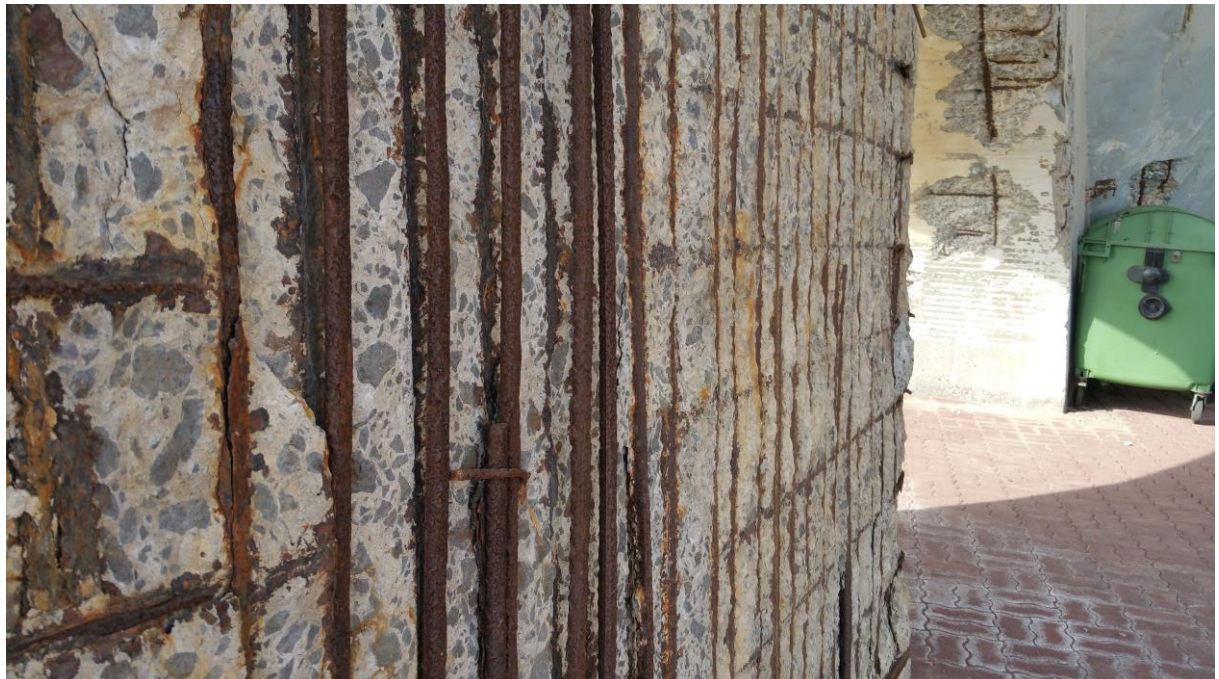


Figura 4.51 – Degradação dos pilares

Em algumas das armaduras existentes notou-se uma pequena encurvadura (Figura 4.52) que poderá ter influência na compressão do betão, facto resultante da diminuição da seção do elemento estrutural assim como na redução da seção das armaduras e desaparecimento das mesmas.

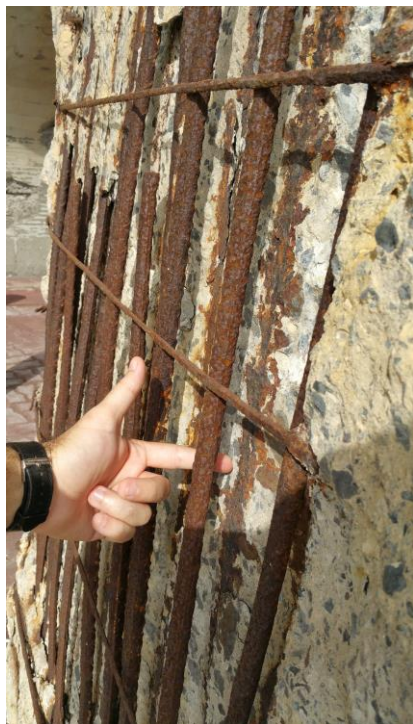


Figura 4.52 – Degradação dos pilhars



Figura 4.53 – Degradação dos pilhars

Noutras secções de alguns pilhars a ausência de armaduras é total onde existem apenas a marcação da corrosão no betão (Figura 4.53).

A Figura 4.54 indica uma delaminação em curso de uma grande seção de um pilar, podemos observar na fenda as armaduras em estado de corrosão em que possivelmente é a causa de tal degradação do betão, assim como grande parte das armaduras no seu interior estarão em fase de corrosão.



Figura 4.54 – Degradação dos pilhars

Seguidamente se apresenta o padrão que se repete em toda a ponte em alçado (Figura 4.55) e em corte a meio vão (Figura 4.56).

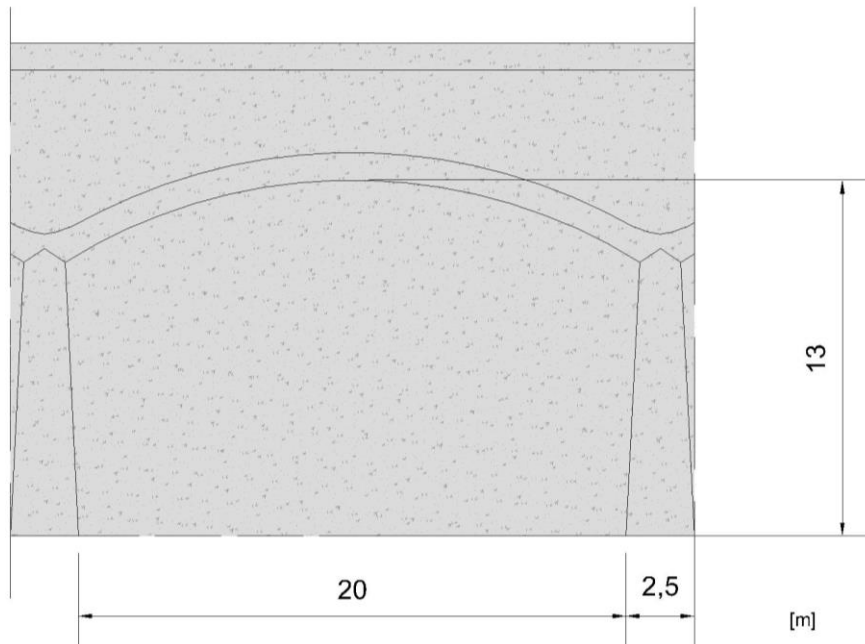


Figura 4.55 – Alçado da estrutura

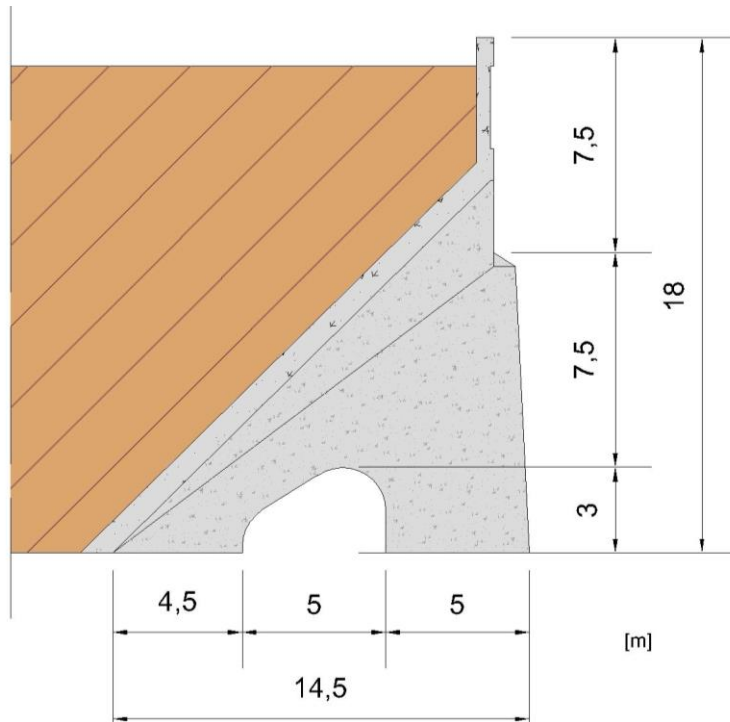


Figura 4.56 – Corte transversal da estrutura

As medidas são aproximadas apesar de se desconhecer a espessura da laje de contenção do talude. Contudo optou-se por efetuar uma estimativa das cargas a que os pilhars estão sujeitos como indica a Figura 4.57.

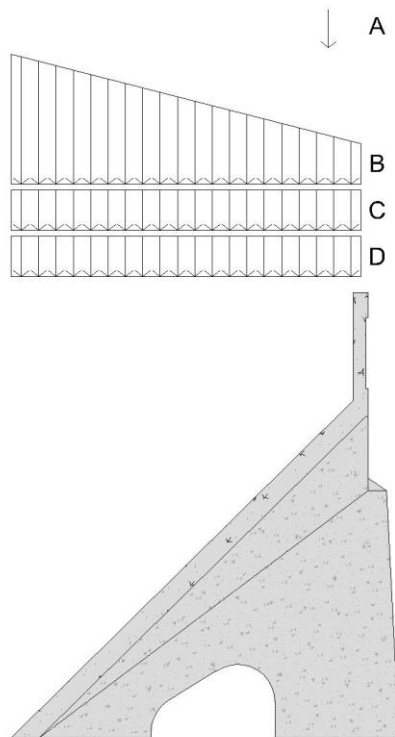


Figura 4.57 – Forças aplicadas à ponte

A carga **A** considerou-se 600 KN, esta carga foi aplicada de acordo com o RSA como sobrecarga na ponte rodoviária e colocou-se a 1 metro da extremidade direita da ponte, esta opção tem como base a localização como a mais desfavorável e a carga única aplicada é uma simplificação do constante no RSA.

Relativamente à carga **B**, esta corresponde ao peso do aterro, visto a laje que o suporta tem altura variável e é redonda considerou-se para efeitos de cálculo a altura média (apenas para dimensionamento do pilar). Devido à incerteza do material do aterro considerou-se uma areia compacta com 22 KN/m^3 , assim sendo considerou-se 374 KN/m à esquerda e 107 KN/m à direita. (note-se que o pavimento da ponte incluiu-se nesta carga de forma a simplificar os cálculos)

A carga **C** representa o peso da laje, como não conhecemos a sua espessura considerou-se 100 cm para efeitos de carga tendo em conta que a laje não está na horizontal nem é plana, assim sendo utilizou-se 25 KN/m^2 para a carga C tendo em conta o peso do betão (25 KN/m^3).

A carga **D** corresponde ao peso da viga sobre os pilhars, esta tem cerca de 2,1 m de altura e uma largura média de 1,7 m, a carga **D** totaliza assim 90 KN/m .

O dimensionamento da laje é desnecessário, uma vez que existem claramente momentos, sendo os mais desfavoráveis os que se situam entre os pilhars, conclui-se que as armaduras lá existentes são necessárias de forma a resistir ao momento cuja ausência existe o risco de colapso da estrutura, verifica-se na Figura 4.49 que as armaduras estão em corrosão mas são existentes. Pelo fato de esta anomalia se encontrar à esquerda, quase junto ao chão é uma mais-valia devido ao possível encastramento o que torna essa zona numa zona de transição de sinal de momentos.

Após os cálculos, uma vez que as áreas dos dois pilhars são semelhantes e o distanciamento é regular, considerou-se uma linha vertical entre os pilhars com igual distância entre eles e separou-se todas as cargas, considerando também que a laje tem um ângulo de 45° e tem espessura significativa assim como a viga, considerou-se que 40% das cargas eram transmitidas axialmente por compressão das vigas e lajes ao solo. Considerou-se também que o laje que contribuía para cada pilar tinha 20 m de comprimento.

De acordo com as medidas abordadas obteve-se o **Quadro 4.1**.

Quadro 4.1 – Forças aplicadas

Identificação das forças consideradas	Valor
A	360 KN
B	4488 KN (esquerda)
	1284 KN (direita)

C	300 KN/m
D	54 KN/m

Considerando o coeficiente de segurança de 1,5 para as cargas permanentes e sobrecargas, que a localização da estrutura enquadra-se numa zona sísmica D de acordo com o RSA e o betão utilizado foi o C30/37, obteve-se as forças de 43 946 KN para o pilar da esquerda e 27 065 KN para o pilar da direita e as áreas da secção dos pilhars 2,20 m² e 0,90 m² respetivamente. As áreas de seção obtidas são muito inferiores às existentes de 9,00 m² e 12,00 m², note-se que dependendo do tipo de zona sísmica a área poderia ter aumento o que não é um caso visto tratar-se da ilha da Madeira. O dimensionamento das armaduras devem ser feitos com base na ação sísmica e ação do vento, sendo estas colocadas de acordo com os regulamentos através de forças horizontais equivalentes. Visto que algumas armaduras dos pilares estão corroídas e outras desapareceram devido à corrosão, a estrutura matem-se em pé possivelmente devido à elevada área de seções dos pilares, um deles seria necessário apenas 24% da seção existente e outro 7,5% da seção existente tendo em consideração que existiam armaduras em perfeito estado. Tal fato poderá ser a causa de a estrutura ter um comportamento adequado às forças horizontais, até porque uma das particularidades de melhor resistir ao sismo de acordo com a zona sísmica é aumentar a área da seção. Neste caso pelo fato de a estrutura manter as suas propriedades levanta-se a dúvida se seriam realmente necessárias as armaduras nos respetivos pilares uma vez que estas praticamente não existem, os pilhars continuam a suportar as cargas que estão sujeitos mas estão degradados com uma estética desagradável numa estrutura de grande importância.

Notifique-se que os cálculos elaborados estão mais próximos de um pré-dimensionamento do que do cálculo em rigor, isto porque não considerou-se necessário aprofundar no âmbito desta dissertação.

Dado o observado, devido às elevadas dimensões dos pilares que podem ser designados de contrafortes, conclui-se que a armadura nos mesmos poderia ter sido dispensada, até porque a maior parte das armaduras deixaram de existir devido á corrosão. O mesmo não se pode dizer da laje devido ás elevadas cargas e grandes vãos, note-se que os maiores momentos numa laje são a meio vão os positivos e em cima do pilar os negativos. Assim sendo a corrosão nessas zonas tem uma perigosidade maior que nas restantes.

5

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. NOTAS FINAIS

Apesar de não ser possível identificar todas as armaduras existentes dentro do betão armado, utilizou-se métodos aproximados para perceber o comportamento estrutural dos elementos em estudo. São muitos os casos de corrosão de armaduras não estruturais, mínimas e construtivas assim como os casos em que as armaduras estruturais desapareceram devido à corrosão mas a estrutura matem-se intacta. Apenas mencionou-se alguns casos, os mais diversificados possíveis de modo a evitar repetições de análises.

5.2. CONCLUSÕES

O betão é severamente degradado devido à corrosão das armaduras que entram em expansão após o início do processo corrosivo. Grande parte da corrosão prematura deve-se à falta de rigor de projeção, à falta de conhecimento e devido ao uso incorreto dos materiais, as estruturas são desenhadas para durar entre 50 e 100 anos, mas tal não se verifica em muitos casos apresentando algumas delas degradação em apenas 5 anos de vida. A maior parte dos casos é devido à escolha do betão incorreto e da aplicação da espessura do recobrimento insuficiente, tal agrava-se e torna-se desnecessário quando a armadura é mínima para controlar a fendilhação por retração do betão, ou quando as armaduras são não estruturais. Estas armaduras, como as não construtivas, não contam para o cálculo estrutural onde a sua principal função é impedir a degradação do betão, o que acaba por acontecer devido a outros fatores. Em certos casos o aço poderia ser substituído por outro material como no caso das pontes pedonais sobre o mar uma vez que o teor de cloretos é demasiado alto, poder-se-ia também ter aumentado o recobrimento

noutros casos mas com o risco de este fendilhar devido à retração devido às espessuras elevadas, e noutros casos poder-se-ia simplesmente ter dispensado as armaduras para evitar que estas corroessem. Noutros casos a solução poderá ser mais complexa como é o caso da laje do aeroporto em que não estava previsto o mar agitar-se como o ocorrido. Após o observado todas patologias em análise foram causadas devido a erros humanos, atualmente os regulamentos estão muito completos e se forem aplicados corretamente e a obra executada corretamente não existirá problemas prematuras de degradação das mesmas, contudo e uma vez que uma obra não é feita apenas por uma pessoa, irá sempre conter erros que devém ser fiscalizados por pessoal competente para o efeito. Conclui-se ainda que o regulamento poderia ser um pouco mais severo na questão da degradação de forma a cobrir os erros de execução.

5.3. PERSPETIVAS FUTURAS

Nesta dissertação, as conclusões foram feitas com base em observações visuais em elementos de betão armado, que se desconhece qual foi o método de cálculo utilizado assim como os constituintes do betão e posicionamentos das armaduras. Seria sensato controlar a ausência de armaduras construtivas e não estruturais num ambiente controlado.

REFERÊNCIAS

1. Du YG, Chan AHC, Clark LA, Wang XT, Gurkalo F, Bartos S. Finite element analysis of cracking and delamination of concrete beam due to steel corrosion. *Engineering Structures*. 2013;56:8-21.
2. Santos TMHd. *Corrosão das Armaduras do Betão Armado Causas, Consequências, Prevenção e Projeto de Durabilidade [Dissertação]*: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa; 2014.
3. NP EN 206-1 2007, *Betão Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade*, (2007).
4. António Costa JA. *Estruturas de betão I, Parte II Materiais*. Grupo de Estruturas de Betão Armado: Instituto Superior Técnico, 2002.
5. Carminho FJTH. *Resistência do betão à compressão em cubos VS cilindros*: Faculdade de Ciências e Tecnologia; 2012.
6. Coutinho JdS. *Ciências de Materiais. Documento Provisório*. 2002;1ª Parte:21.
7. Augusto Gomes APFP, Bessa Pinto. *Cimento Portland e Adições*. 2013;Materiais de Construção:53.
8. Angst U. *Chloride induced reinforcement corrosion in concrete*: Norwegian University of Science and Technology; 2011.
9. Souto JVA. *Patologias na formulação de um betão na ilha da Madeira*: Universidade da Madeira; 2010.
10. Campos PGdS. *Betões Eco-Eficientes com Elevados Teores de Adições Minerais [Mestrado]*: Universidade do Minho; 2012.
11. Ferreira RM. *Avaliação de ensaios de durabilidade do betão*: Universidade do Minho; 2000.
12. Camara JNd. *Estruturas de Betão I*: Instituto Superior Técnico de Lisboa; 2014.
13. Lobo P. *Materiais de construção, Metais Ferrosos*. Universidade da Madeira, 2013.
14. França P. *Betão Armado I*. Universidade da Madeira, Engenharia DdCED; 2012.
15. Carmen Andrade IM. *Embedded sensors for the monitoring of corrosion parameters in concrete structures* In: NDTCE'09 N-DTiCEN, editor. 2009.
16. *Betões - Metodologia prescritiva para uma vida útil de projeto de 50 e de 100 anos face às acções ambientais*, (2007).

17. Cui H, Tang W, Liu W, Dong Z, Xing F. Experimental study on effects of CO₂ concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms. *Construction and Building Materials*. 2015;93:522-7.
18. Köliö A, Niemelä PJ, Lahdensivu J. Evaluation of a carbonation model for existing concrete facades and balconies by consecutive field measurements. *Cement and Concrete Composites*. 2016;65:29-40.
19. Jennifer L. Kepler DD, Carl E. Locke, Jr. Evaluation of corrosion protection methods for reinforced concrete highway structures: University of Kansas; 200.
20. Malheiro R, Ferreira RM, Camões A, Ribeiro B, editors. Análise da sensibilidade dos parâmetros de um modelo para previsão da profundidade de carbonatação e sua aplicação em estruturas reais 2013 2013-01-01.
21. Júlio Appleton AC. Reabilitação e Reforço de Estruturas. Instituto Superior Técnico 2011. p. 215.
22. Lage JRM. Estudo da influência da amostragem e da metodologia de colheita de betão em pó para a determinação do teor de cloretos: Instituto Superior Técnico de Lisboa; 2013.
23. Pehkonen A. The effect of dissolved ozone on the corrosion behaviour of some stainless steels: Helsinki University of Technology; 2001.
24. Busba ER. Effect of Localized Corrosion of Steel on Chloride-Induced Concrete Cover Cracking in Reinforced Concrete Structures: University of South Florida; 2013.
25. Köliö A, Honkanen M, Lahdensivu J, Vippola M, Pentti M. Corrosion products of carbonation induced corrosion in existing reinforced concrete facades. *Cement and Concrete Research*. 2015;78, Part B:200-7.
26. Otieno M. Corrosion Propagation in cracked and uncracked concrete: University of Cape Town; 2008.
27. ABOSRRA LR. Corrosion of steel reinforcement in concrete: University of Bradford, UK.; 2010.
28. Guia para a utilização da norma NP EN 206-1, A especificação do betão, (2008).
29. Pereira TR. Corrosão em armaduras de concreto: Universidade Federal do Paraná; 2010.
30. Nishida T. Influence of temperature on deterioration process of reinforced concrete members due to steel corrosion: Department of International Development Engineering; 2005.
31. Polito G. Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação: Universidade Federal de Minas Gerais; 2006.
32. Varela RHD. Corrosão das Armaduras em Betão Armado: Influência dos Agentes Cloretos e da Carbonatação nas Edificações de Cabo Verde: Universidade Jean Piaget de Cabo Verde; 2010.
33. By M. Collepari SC, J.J. Ogoumah Olagot and F. Simonelli. The Influence of Slag and Fly Ash on the Carbonation of Concretes. 2014:12.

34. Miyagawa T. Early Chloride corrosion of reinforcing steel in concrete. Research Information Repository: Kyoto University; Fevereiro de 1985.
35. Yu Z, Chen Y, Liu P, Wang W. Accelerated simulation of chloride ingress into concrete under drying–wetting alternation condition chloride environment. 2015.
36. Sanchez AN. Forecasting Corrosion of Steel in Concrete Introducing Chloride Threshold Dependence on Steel Potential: University of South Florida; 2014.
37. Silva N. Chloride Induced Corrosion of Reinforcement Steel in Concrete: Chalmers University of Technology; 2013.
38. Olivier Poupard AAt-M, Paul Dumargue. Corrosion by chlorides in reinforced concrete: Determination of chloride concentration threshold by impedance spectroscopy. Pergamon. 2003;LEPTAB, University of La Rochelle.
39. António Costa JA. Concrete Carbonation and chloride penetration in a marine environment. Concrete Science and Engineering: 2001 03/12/2001. Report No.
40. SAEKI T. Effect of Carbonation on Chloride Penetration in Concrete. 2002:14.
41. Papakonstantinou KG, Shinozuka M. Probabilistic model for steel corrosion in reinforced concrete structures of large dimensions considering crack effects. Engineering Structures. 2013;57:306-26.
42. Guo Y. Assessing the Seismic Performance of Corroding RC Bridge Columns: Oregon State University; Setembro de 2011.
43. Ma F-Y. Corrosive Effects of Chlorides on Metals. Taiwan: Department of Marine Engineering, NTOU, 2012.
44. Lambert P. Corrosion and Passivation of steel in concrete: University of Aston in Birmingham; 1983.
45. J. Appleton AC, P. França. Efeitos estruturais da deterioração em estruturas de betão armado. Encontro Nacional Betão Estrutural. 2004:8.
46. Liu Y. Modeling the Time-to-Corrosion Cracking of the Cover Concrete in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures: Virginia Polytechnic Institute; 1996.
47. Ioannis Balafas CJB. Modeling the Structural Effects of Rust in Concrete Cover. American Society of Civil Engineers. 2011:11.
48. Séverine Marie Noëlle Cambier. Atmospheric corrosion of coated steel, relationship between laboratory and field testing: Ohio State University; 2014.
49. Farías JP. Corrosion of Steel in Cracked Concrete, Chloride Microanalysis and Service Life Predictions: Civiele Techniek aan Technische Universiteit Delft geboren te Monterrey, México; 2015.
50. Custódio J. Degradação do betão por reações expansivas internas - Diagnóstico e Prognóstico. LNEC. 2015.

51. Catarino RAM. Reabilitação de Superfície em Betão Aparente: Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto FEUP; 2010.
52. Borges AM. Análise do Comportamento de Juntas de Betonagem: Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico; 2008.
53. Brandão NB. Análise Competitiva de Soluções em Laje Fungiforme e Vigada: Instituto Superior Técnico, Lisboa; 2013.
54. Costa A. Patologia do betão Armado, Anomalias e Mecanismos de Deterioração. Instituto Superior Técnico. 2007:45.
55. LNEC. Betões - Metodologia prescritiva para uma vida útil de projeto de 50 e de 100 anos face às ações ambientais. 2007:16.
56. LNEC. Eurocódigo 2 - Projecto de estruturas de betão. Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios: Instituto Português da Qualidade; Março de 2010. p. 259.
57. REBAP, Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado, Decreto-Lei n.º 349-C/83 de 30 de Julho, (1983).
58. RSA, Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes, Decreto-Lei n.º 235/83 de 31 de Maio. 1983:34.
59. NP ENV 13670-1 2007, Execução de estruturas em betão, Parte 1: Regras gerais, (2007).