

Corrosão do Betão Armado Induzida
por Carbonatação e pela
Presença de Cloretos

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Eduardo Manuel Sousa Freitas
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL



UNIVERSIDADE da MADEIRA

A Nossa Universidade
www.uma.pt

Setembro | 2013

Corrosão do Betão Armado Induzida por Carbonatação e pela Presença de Cloretos

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Eduardo Manuel Sousa Freitas

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

ORIENTAÇÃO

José Carlos Antunes Marques



CORROSÃO DO BETÃO ARMADO INDUZIDA POR CARBONATAÇÃO E PELA PRESENÇA DE CLORETOS

Eduardo Manuel de Sousa Freitas

Dissertação apresentada à Universidade da Madeira para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Mestre em **Engenharia Civil**.

Funchal, Setembro de 2013



CORROSÃO DO BETÃO ARMADO INDUZIDA POR CARBONATAÇÃO E PELA PRESENÇA DE CLORETOS

Eduardo Manuel de Sousa Freitas

Licenciado em Engenharia Civil

Orientador:

Profº. Doutor José Carlos Antunes Marques

Dissertação apresentada à Universidade da Madeira para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Mestre em **Engenharia Civil**.

Funchal, Setembro de 2013

“O trabalho é, na maioria das vezes, o pai do prazer.”

François Marie Arouet (Voltaire), (1694-1778)

Índice Geral

ÍNDICE GERAL	VII
RESUMO	XI
ABSTRACT	XIII
PALAVRAS-CHAVE	XV
KEY-WORDS	XV
AGRADECIMENTOS	XVII
ÍNDICE DE TEXTO	XIX
ÍNDICE DE FIGURAS	XXIII
SIMBOLOGIA DOS ELEMENTOS QUÍMICOS	XXVII
SIGLAS	XXIX
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ÂMBITO E OBJECTIVOS	1
1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2
2 DURABILIDADE	3
2.1 VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO	5
2.1.1 Vida residual	6
2.1.2 Período de iniciação	6
2.1.3 Período de propagação	6
3 CORROSÃO	9
3.1 CORROSÃO NO BETÃO ARMADO	9
3.2 FORMAS DE CORROSÃO	12
3.3 DETERIORAÇÃO POR CORROSÃO	14
3.3.1 Deterioração do betão	15
3.3.2 Deterioração das armaduras	16
3.3.3 Deterioração de outros elementos	16
3.3.4 Evolução do processo de deterioração	16
4 CORROSÃO INDUZIDA PELA CARBONATAÇÃO	19
4.1 FACTORES QUE INFLUENCIAM A CARBONATAÇÃO	21
4.1.1 Factores Externos	21
4.1.2 Factores Internos	23
4.2 MEDIÇÃO DA CARBONATAÇÃO	27

4.3	MODELOS DE PREVISÃO DA CARBONATAÇÃO	29
4.3.1	<i>Ensaaios acelerados</i>	32
5	CORROSÃO INDUZIDA POR IÕES DE CLORETO	35
5.1	MECANISMOS DE TRANSPORTE	37
5.2	LIMITE CRÍTICO DE IÕES DE CLORETO	39
5.3	FACTORES QUE INFLUENCIAM VELOCIDADE E PENETRAÇÃO POR PARTE DOS CLORETOS.....	40
5.4	MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE TEOR DE CLORETOS	42
6	RECOBRIMENTO	45
7	CLASSES DE EXPOSIÇÃO	47
7.1	NP ENV 206 E LNEC E- 464.....	47
7.2	COMBINAÇÃO DE CLASSES DE EXPOSIÇÃO	49
8	NP EN 1504 “PRODUTOS E SISTEMAS PARA A PROTECÇÃO E REPARAÇÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO”	51
8.1	PRINCÍPIOS DA NORMA EN 1504.....	51
9	MÉTODOS DE PROTECÇÃO/REABILITAÇÃO.....	55
9.1	TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS.....	56
9.1.1	<i>Protecção catódica</i>	56
9.1.1.1	Descrição do processo	57
9.1.1.2	Protecção Catódica Galvânica.....	58
9.1.1.3	Protecção Catódica por Corrente Imposta	62
9.1.2	<i>Realcalinização electroquímica</i>	65
9.1.3	<i>Extracção de Cloretos ou Dessalinização</i>	68
9.2	REVESTIMENTOS	70
9.2.1	<i>Revestimentos Superficiais</i>	70
9.2.2	<i>Impregnação hidrófuga</i>	72
9.2.3	<i>Impregnantes</i>	72
9.2.4	<i>Aplicação do sistema de protecção superficial no betão</i>	73
9.2.5	<i>Galvanização das armaduras</i>	74
9.2.6	<i>Resinas epóxi aplicadas na armadura</i>	75
9.3	ARMADURAS ESPECIAIS	76
9.3.1	<i>Aço Inoxidável</i>	76
9.3.2	<i>Varões FRP</i>	77
9.4	INIBIDORES DE CORROSÃO	78
9.4.1	<i>Classificação dos inibidores de corrosão</i>	79

10	CASO DE ESTUDO	83
10.1	INTRODUÇÃO	83
10.2	CARACTERIZAÇÃO HISTÓRICA E GEOGRÁFICA DO CONJUNTO HABITACIONAL DA PALMEIRA.....	83
10.3	METODOLOGIA UTILIZADA	84
10.3.1	<i>Levantamento das patologias encontradas</i>	<i>85</i>
10.3.2	<i>Compreensão das causas da ruína do muro</i>	<i>87</i>
10.3.3	<i>Levantamento geométrico dos muros.....</i>	<i>88</i>
10.3.4	<i>Recolha de carotes e respectivos ensaios de carbonatação e teor de cloretos.</i>	<i>89</i>
10.4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	98
11	CONCLUSÃO	101
12	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105
ANEXOS		111
	ANEXO A – QUADROS E GRÁFICOS	111
	ANEXO B – BOLETINS DOS ENSAIOS PROVENIENTES DO CASO PRÁTICO	121
	ANEXO D – DESENHOS E PLANTAS	161

Corrosão do Betão Armado por Efeito de Carbonatação e pela presença de Cloretos

Resumo

Este trabalho centra-se na problemática da corrosão do betão armado induzida por carbonatação e pela presença de cloretos.

Após uma pequena reflexão sobre a durabilidade das estruturas de betão armado e da diminuição da sua vida útil por efeitos de corrosão, é feita uma descrição mais detalhada dos principais efeitos resultantes da carbonatação e da presença de cloretos. São identificados os factores externos e internos que influenciam o aparecimento da carbonatação e da sua progressão (profundidade) e apresentados os métodos mais correntes que permitem a quantificação e previsão deste fenómeno. São também abordadas as causas e efeitos da presença de cloretos, nomeadamente no que diz respeito aos mecanismos de transporte, aos factores que influenciam a velocidade e penetração, bem como os métodos que permitem a determinar a presença de cloretos nas estruturas.

De seguida são abordados aspectos relacionados com a protecção e reabilitação de estruturas afectadas pelos dois processos de degradação, nomeadamente a utilização de técnicas electroquímicas, de revestimentos, armaduras especiais e inibidores de corrosão.

Por fim, é apresentado um caso de estudo envolvendo os muros de contenção situados num complexo habitacional do concelho de Câmara de Lobos, em parte afectados pelos processos abordados no trabalho, onde são apresentados alguns resultados dos ensaios laboratoriais para a quantificação da carbonatação e o teor de cloretos.

O estudo realizado permitiu tirar ilações interessantes quer sobre cada um dos processos, quer sobre o efeito conjunto da carbonatação e presença cloretos, dado que a presença da carbonatação influencia directamente a penetração de cloretos e potencia os seus efeitos. Tendo em conta a morfologia da Madeira e o facto de a construção ser feita a pouca distância do mar, pretende-se que o trabalho possa servir de apoio quer à realização de novos projectos, quer à protecção/reabilitação de estrutura.

Corrosion of Reinforced Concrete induced by Carbonation and the presence of chlorides

Abstract

This work is focused on the corrosion of reinforced concrete induced by carbonation and the presence of chlorides.

After a small consideration on the durability of concrete structures and the reduction of their life time by the effects of corrosion, a more detailed description of the main effects of carbonation and the presence of chlorides is presented. External and internal factors influencing carbonation and its progression (depth) are identified and the most current methods that enable the quantification and prediction of this phenomenon are presented. The causes and effects of the presence of chlorides, especially with regard to the mechanisms of transport and the factors influencing the speed and penetration are also covered, as well as the methods used to determine the presence of chlorides in the structures.

Then, aspects related to the protection and rehabilitation of structures affected by the two degradation processes, namely by the use of electrochemical techniques, coatings, special armor and corrosion inhibitors are discussed.

Finally , a case study involving the retaining integrated in a housing complex (Câmara de Lobos) is described. The walls are partly affected by the processes described in this work and some results of laboratory tests for the quantification of carbonation and the content of chlorides are discussed .

The study shows the relevance and impact of isolated processes and stresses on the combined effect of the presence of chlorides and carbonation, given that carbonation directly influences the penetration of chlorides and enhances their effects. Considering the morphology of Madeira and the fact that construction is usually near the shore, it is intended that the work can serve either to support new projects, or studies involving the protection / rehabilitation of structures.

Palavras-chave

Corrosão

Betão

Durabilidade

Classe de exposição

Recobrimento

Cloretos

Carbonatação

Key-Words

Corrosion

Concrete

Durability

Exposure class

Coating

Chlorides

Carbonation

Agradecimentos

A dissertação que apresento é o culminar de muitos anos de trabalho árduo e por vezes de enorme dificuldade. Gostaria de destacar a generosidade, a amizade, a paciência, a força, e o apoio incondicional que recebi, durante estes anos, por parte dos meus colegas e, especialmente, dos meus amigos que mantiveram-se fiéis e ajudaram nas boas, e especialmente, nas piores alturas do meu percurso académico.

Aos meus amigos João Drummond, Roberto Aguiar, Gonçalo Basílio, Jorge Rocha, Décio Mendes, Doutora Andreia Nascimento, Carlos Diogo Pereira, João Baptista, Nuno Rodrigues, Rúben Sousa e Humberto Jardim gostaria de deixar aqui o meu obrigado por tudo o que por mim fizeram e ainda continuam a fazer só espero que um dia tenha oportunidade de retribuir a amizade e o apoio que me deram.

Ao Luís Eduardo Nicolau e ao César Pestana um obrigado parece-me muito pouco para aquilo que vocês fizeram por mim durante este tempo todo, esta minha “conquista” só é possível graças a vocês.

À Isabel Teles um enorme obrigado, pelo seu companheirismo, amizade, compreensão e carinho demonstrado ao longo de todo este tempo.

Aos meus pais, e a minha irmã, a minha eterna gratidão pelo esforço, pela dedicação, pelo carinho, apoio. Nada do que eu posso aqui escrever, conseguirá descrever a minha gratidão.

Aproveito estas linhas para agradecer aos professores da Universidade da Madeira que, ao longo destes anos, ajudaram-me a atingir uma outra fase de maturidade, através de ensinamentos teóricos e práticos, sem os quais não poderia realizar este projecto.

Ao Dr. César Fernandes e a toda a sua equipa do Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC) obrigado pela paciência, pela ajuda, pelos conselhos e, principalmente, disponibilidade durante todo este processo.

Ao Engenheiro Roberto Silva, da, Investimentos Habitacionais da Madeira (IHM) um agradecimento pela sua ajuda e disponibilidade demonstrada.

Gostaria de agradecer, em especial, ao Professor Doutor José Carlos Antunes Marques por ter aceitado ser meu orientador, pelo seu acompanhamento e orientação, pelos seus comentários, pelas suas indicações e sugestões e pelo seu apoio, imprescindível.

Índice de texto

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	ÂMBITO E OBJECTIVOS.....	1
1.2	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	2
2	DURABILIDADE	3
2.1	VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO	5
2.1.1	<i>Vida residual</i>	6
2.1.2	<i>Período de iniciação</i>	6
2.1.3	<i>Período de propagação</i>	6
3	CORROSÃO	9
3.1	CORROSÃO NO BETÃO ARMADO	9
3.2	FORMAS DE CORROSÃO	12
3.3	DETERIORAÇÃO POR CORROSÃO.....	14
3.3.1	<i>Deterioração do betão</i>	15
3.3.2	<i>Deterioração das armaduras</i>	16
3.3.3	<i>Deterioração de outros elementos</i>	16
3.3.4	<i>Evolução do processo de deterioração</i>	16
4	CORROSÃO INDUZIDA PELA CARBONATAÇÃO	19
4.1	FACTORES QUE INFLUENCIAM A CARBONATAÇÃO	21
4.1.1	<i>Factores Externos</i>	21
4.1.2	<i>Factores Internos</i>	23
4.2	MEDIÇÃO DA CARBONATAÇÃO	27
4.3	MODELOS DE PREVISÃO DA CARBONATAÇÃO	29
4.3.1	<i>Ensaio acelerados</i>	32
5	CORROSÃO INDUZIDA POR IÕES DE CLORETO	35
5.1	MECANISMOS DE TRANSPORTE	37
5.2	LIMITE CRÍTICO DE IÕES DE CLORETO	39
5.3	FACTORES QUE INFLUENCIAM VELOCIDADE E PENETRAÇÃO POR PARTE DOS CLORETOS.....	40
5.4	MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE TEOR DE CLORETOS	42
6	RECOBRIMENTO	45
7	CLASSES DE EXPOSIÇÃO	47
7.1	NP ENV 206 E LNEC E- 464.....	47
7.2	COMBINAÇÃO DE CLASSES DE EXPOSIÇÃO	49

8	NP EN 1504 “PRODUTOS E SISTEMAS PARA A PROTECÇÃO E REPARAÇÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO”	51
8.1	PRINCÍPIOS DA NORMA EN 1504	51
9	MÉTODOS DE PROTECÇÃO/REABILITAÇÃO	55
9.1	TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS	56
9.1.1	<i>Protecção catódica</i>	56
9.1.2	<i>Realcalinização electroquímica</i>	65
9.1.3	<i>Extracção de Cloretos ou Dessalinização</i>	68
9.2	REVESTIMENTOS	70
9.2.1	<i>Revestimentos Superficiais</i>	70
9.2.2	<i>Impregnação hidrófuga</i>	72
9.2.3	<i>Impregnantes</i>	72
9.2.4	<i>Aplicação do sistema de protecção superficial no betão</i>	73
9.2.5	<i>Galvanização das armaduras</i>	74
9.2.6	<i>Resinas epóxi aplicadas na armadura</i>	75
9.3	ARMADURAS ESPECIAIS	76
9.3.1	<i>Aço Inoxidável</i>	76
9.3.2	<i>Varões FRP</i>	77
9.4	INIBIDORES DE CORROSÃO	78
9.4.1	<i>Classificação dos inibidores de corrosão</i>	79
10	CASO DE ESTUDO	83
10.1	INTRODUÇÃO	83
10.2	CARACTERIZAÇÃO HISTÓRICA E GEOGRÁFICA DO CONJUNTO HABITACIONAL DA PALMEIRA	83
10.3	METODOLOGIA UTILIZADA	84
10.3.1	<i>Levantamento das patologias encontradas</i>	85
10.3.2	<i>Compreensão das causas da ruína do muro</i>	87
10.3.3	<i>Levantamento geométrico dos muros</i>	88
10.3.4	<i>Recolha de carotes e respectivos ensaios de carbonatação e teor de cloretos</i>	89
10.4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	98
11	CONCLUSÃO	101
12	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
	ANEXOS	111
	ANEXO A – QUADROS E GRÁFICOS	111
	ANEXO B – BOLETINS DOS ENSAIOS PROVENIENTES DO CASO PRÁTICO	121
	ANEXO D – DESENHOS E PLANTAS	161

Índice de Quadros

Quadro 1 - Categorias de vida útil previstas na norma EN 1990.....	5
Quadro 2 - Relação entre as classes de exposição do quadro 4.1 da NP EN 206 e as classes de resistência do betão (EN-1992).....	8
Quadro 3 - Estados limites de fendilhação para armaduras ordinárias	26
Quadro 4 - Valores recomendados para abertura de fendas no betão (EN 1992-1-1:2004).	26
Quadro 5 - Valores do quociente entre o coeficiente de carbonatação acelerada e em exposição natural.....	33
Quadro 6 - Valores máximos do teor de cloretos admitido por massa de cimento (EN 206-1).	39
Quadro 7 - Valor limite crítico de cloreto em alguns países.....	39
Quadro 8 - Valores de recobrimento mínimo, requisitos relativos á durabilidade das armaduras para betão armado de acordo com a EN1992-1:2004.....	46
Quadro 9 - limites da composição e da classe de resistência do betão sob acção do dióxido de carbono para uma vida útil de 50 anos (LNEC E 464)	48
Quadro 10 - limites da composição e da classe de resistência do betão sob acção de cloretos para uma vida útil de 50 anos (LNEC E 464).....	49
Quadro 11 - Combinações de classe de exposição (LNEC- E- 464).	50
Quadro 12 - Métodos de protecção/reparação de anomalias referentes ao betão e armaduras	54
Quadro 13 - Métodos complementares de protecção das armaduras	55
Quadro 14 - Sistemas de protecção da corrosão das armaduras.....	56
Quadro 15 - Comparação entre os sistemas de protecção catódica.	65
Quadro 16 - Revestimentos superficiais recomendados tendo em conta as condições de serviço	71
Quadro 17 - Taxa média de corrosão em aço galvanizado	74
Quadro 18 - Comparação entre revestimentos aplicáveis a armaduras	76
Quadro 19 - Acção de alguns inibidores de corrosão no betão	81
Quadro 20 - Metodologia utilizada para a identificação das causas de degradação dos muros de suporte.....	84
Quadro 21 - Resultados do ensaio à compressão das carotes de betão correspondentes ao muro que ruíu.	87
Quadro 22 - Resultado do ensaio á tracção dos varões de aço.	88
Quadro 23 - Resultado do ensaio à compressão das carotes do betão carbonatado..	92
Quadro 24 - Propriedades geométricas dos muros.	111

Quadro 25 - Resultados do ensaio à compressão de betão não contaminado.....	114
Quadro 26 - Tabela de teor de cloretos.....	116
Quadro 27 - Profundidade de carbonatação e Teor de cloretos por massa de cimento.	117
Quadro 28 - Classes de exposição ambiental (NP EN 206-1).....	119

Índice de Figuras

Figura 1 - Modelo de vida útil de Tutti	5
Figura 2 - Vida residual.....	6
Figura 3 - Vida útil e vida residual	7
Figura 4 - Diagrama de Pourbaix para o sistema água/ferro a 25°C.	10
Figura 5 - Representação esquemática da corrosão da armadura.....	10
Figura 6 - Corrosão numa fissura.....	11
Figura 7 - Volume relativo do produto de corrosão	12
Figura 8 - Efeitos da corrosão da armadura: A)-fendilhação, B)-descamação, C)-delaminação e D)- efeito nos cantos.....	12
Figura 9 - Corrosão generalizada num pilar	13
Figura 10 - Tipos de corrosão	14
Figura 11 - Representação da deterioração do betão	16
Figura 12 - Representação esquemática da deterioração das armaduras	16
Figura 13 - Evolução do processo de deterioração	16
Figura 14 - Representação esquemática do avanço da frente de carbonatação	19
Figura 15 - Destacamento do betão carbonatado após corrosão das armaduras (esquerda). Padrão de fissuração segundo a malha de armaduras, devido à carbonatação (direita).....	20
Figura 16 - Avanço do processo de carbonatação	20
Figura 17 - Conteúdo de água nos poros do betão em função da humidade	22
Figura 18 - Profundidade de carbonatação em relação à humidade relativa e o teor de CO ₂	22
Figura 19 - Influência da cura na profundidade de carbonatação.....	24
Figura 20 - Efeito da relação água-cimento na profundidade de carbonatação	24
Figura 21 - Representação esquemática da carbonatação no interior de uma fenda..	25
Figura 22 - Influência da resistência à compressão do betão sobre a carbonatação...	27
Figura 23 - Dois tipos de indicadores comerciais	28
Figura 24 - Fenolftaleína aplicada a um provete	29
Figura 25 - Medição da frente de carbonatação.....	29
Figura 26 - Difusão de CO ₂ através do elemento controlado.....	30
Figura 27 – Ábaco para a determinação da profundidade de carbonatação	31
Figura 28 - Profundidade de carbonatação em função do tempo.....	31
Figura 29 - Representação esquemática de uma câmara de carbonatação.....	32
Figura 30 - Corrosão da armadura por "picadas" produzida por cloretos	36

Figura 31 - Mecanismos de transporte numa estrutura de betão em ambiente marítimo	37
Figura 32 - Efeito da relação água/cimento na penetração de cloretos.	41
Figura 33 - Efeito da cura e da relação água/cimento na profundidade de alcance dos cloretos.....	41
Figura 34 - Ábaco para obtenção da espessura de recobrimento com relação à carbonatação em função do tipo de betão e da vida útil de projecto desejada.....	46
Figura 35 - Combinação de classes de exposição para zonas interiores e zonas costeiras	50
Figura 36 - Esquema da influência sobre os cloretos de um sistema de protecção catódica	57
Figura 37 - Esquema de um sistema de protecção catódica com ânodo sacrificial distribuído.....	58
Figura 38 - Série galvânica	59
Figura 39 - Ânodo galvânico de zinco	60
Figura 40 - Malha de zinco e colocação dos encamisamentos de fibra de vidro	61
Figura 41 - Aplicação de metais por projecção sobre uma estrutura de betão armado	61
Figura 42 - Ânodos enterrados de magnésio e zinco	62
Figura 43 - Instalação esquemática de um sistema de ânodo adesivo de zinco	62
Figura 44 - Sistema de protecção catódica por corrente imposta.....	63
Figura 45 - Malha de titânio para aplicação de protecção catódica	64
Figura 46 - Fitas de titânio para aplicação de protecção catódica.....	64
Figura 47 - Ânodo de titânio enterrado.....	64
Figura 48 - Evolução do processo da realcalinização	67
Figura 49 - Evolução da dessalinização.....	70
Figura 50 - Representação esquemática de um revestimento superficial	70
Figura 51 - Representação esquemática de uma impregnação hidrófuga.....	72
Figura 52 - Representação esquemática de um sistema de impregnação	72
Figura 53 - Corrosão devido a ruptura da película de resina numa armadura.....	75
Figura 54 - Armaduras com película de base epóxi.	75
Figura 55 - Armaduras com aço Inox	77
Figura 56 - Processo de inibição na superfície anódica	79
Figura 57 - Processo de inibição na superfície catódica	80
Figura 58 - Fotografia aérea e projecto arquitectónico do Conjunto Habitacional da Palmeira	84
Figura 59 - Muros de suporte: a) Muro "M16"; e b) Muro "M11".	85

Figura 60 - Desaprumos: Muros a)"M9"; b)"M15"; c)"M24".	85
Figura 61 - Locais onde a armadura ficou exposta devido a falta de recobrimento a)"M22"; b)"M7"; c) "M10".	86
Figura 62 - Destacamento da camada do coroamento do muro "M 14a".	86
Figura 63 - Furos de drenagem obstruídos.	86
Figura 64 - Muro que ruiu.	87
Figura 65 - Aumento das alturas iniciais dos muros ("M8", "M22").	89
Figura 66 - Recolha de carotes do muro "M13" que ruiu.	90
Figura 67 - Ensaio de presença de carbonatação com recurso a indicador de pH fenolftaleína.	91
Figura 68 - Resultados do ensaio de medição de frente de carbonatação.	91
Figura 69 - Estufa utilizada no processo de secagem das carotes.	92
Figura 70 - Moinho utilizado na transformação de carotes em pó.	93
Figura 71 - Processo de toma analítica: a) amostra; b) balança; c) medição de 5 g proveniente da amostra.	93
Figura 72 - Introdução da placa magnética para agitação da solução.	94
Figura 73 - Ebulição da solução durante 3 min.	94
Figura 74 - Filtragem auxiliada com água quente.	94
Figura 75 - Material filtrado.	94
Figura 76 - Nitrato de prata.	95
Figura 77 - a) solução inicial; b) solução final após titulação.	95
Figura 78 - Tituladora automática.	96
Figura 79 - Resultado final da adição de nitrato de prata na amostra e criação de cloreto de prata.	96
Figura 80 - Resultado final da adição de nitrato de prata na amostra e criação de cloreto de prata.	97
Figura 81 - Curva potenciométrica.	97
Figura 82 - Teor de cloretos por massa de cimento.	98
Figura 83 - Perda de secção por corrosão induzida pela presença de cloretos.	99
Figura 84 - Insuficiência de espessura de recobrimento.	100
Figura 85 - Provete nº 16 do ensaio a carbonatação	100
Figura 86 - Boletim do ensaio à tracção.	121
Figura 87 - Boletim do ensaio à tracção.	122
Figura 88 - Boletim do ensaio à tracção.	123
Figura 89 - Ensaio à compressão do betão do muro que ruiu.	124
Figura 90 - Boletim do ensaio a compressão do betão.	125
Figura 91 - Boletim do ensaio a compressão.	126

Figura 92 - Boletim do ensaio a compressão.	127
Figura 93 - Boletim do ensaio a compressão.	128
Figura 94 - Boletim do ensaio à compressão do betão (carotes sobre o efeito de carbonatação).....	129
Figura 95 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº1.	130
Figura 96 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº2.	131
Figura 97 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº3.	132
Figura 98 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº4.	133
Figura 99 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº5.	134
Figura 100 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº6.	135
Figura 101 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº7.	136
Figura 102 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº8.	137
Figura 103 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº9.	138
Figura 104 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº10.	139
Figura 105 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº11.	140
Figura 106 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº12.	141
Figura 107 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº13.	142
Figura 108 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº14.	143
Figura 109 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº15.	144
Figura 110 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº16.	145
Figura 111 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº17.	146
Figura 112 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº18.	147
Figura 113 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº19.	148
Figura 114 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº20.	149
Figura 115 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº21.	150
Figura 116 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº22.	151
Figura 117 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº23.	152
Figura 118 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº24.	153
Figura 119 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº25.	154
Figura 120 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº26.	155
Figura 121 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº27.	156
Figura 122 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº28.	157
Figura 123 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº29.	158
Figura 124 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº30.	159
Figura 132 - Planta de ligação dos pontos de recolha das carotes.	162
Figura 133 - Planta de identificação dos muros.	162

Simbologia dos elementos químicos

Símbolo	Descrição
HCl	Ácido clorídrico
H ₂ O	Água
C ₃ A	Aluminato tricálcico
CaCO ₃	Carbonato de Cálcio
AgCl	Cloreto de prata
FeCl ₂	Cloreto de Ferro (II)
CO ₂	Dióxido de carbono
e ⁻	Electrão
Fe	Ferro
H	Hidrogénio
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
Fe(OH) ₂	Hidróxido de Ferro(II)
Cl ⁻	Ião cloreto
Fe ⁺⁺	Ião ferroso
OH ⁻	Ião hidróxido
O ₂	Oxigénio
Fe ₂ O ₃	Óxido de Ferro (III)
FeOOH	Óxido de Ferro
Ag	Prata

Siglas

Sigla	Descrição
PC	Protecção catódica
EN	Norma Europeia
NP EN	Norma Portuguesa
NBR	Norma Brasileira Reguladora
REBAP	Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LREC	Laboratório Regional de Engenharia civil
FRP	Família dos Polímeros Reforçados com Fibras Contínuas
pH	Potencial de Hidrogénio
H.r	Humidade Relativa
a/c	Relação água-cimento
DRX	Difracção de Raio-X
TGA	Termogravimetria
DTA	Análise Térmica diferencial
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier
IHM	Instituto de Habitação da Madeira
ppm	Medida por concentração (parte por milhões)
ppb	Medida por concentração (parte por biliões)
[Cl]/[OH]	Relação entre o teor de cloretos e os iões hidroxilo
RILEM	International union of laboratories and experts in constrution materials, systems and structures

1 Introdução

1.1 Âmbito e Objectivos

A crescente utilização do betão armado, a nível mundial ao longo dos últimos anos, é reflectida na sua vasta presença em Portugal, nomeadamente, nos centros urbanos e nas indústrias que nos rodeiam, tornando-o parte do nosso quotidiano. Como tal, o estado de conservação deste pode afectar directamente o estilo de vida de uma população, facto que acentua a importância da manutenção do seu estado de conservação, de modo a que permita uma utilização normal por parte da população.

Uma vez que a preservação das características mecânicas, físicas e estéticas tem um papel importante na utilização das estruturas de betão armado por parte dos utentes, é necessário ter uma compreensão significativa sobre as patologias que poderão afectar o betão a curto e a longo prazo. A compreensão destas patologias permite o desenvolvimento de técnicas e de produtos de reabilitação eficazes no combate ao desgaste do betão armado aumentando, assim, a sua durabilidade. Entre as patologias mais comuns e preocupantes encontra-se a corrosão no betão armado, induzida pela carbonatação e contaminação por cloretos, os quais podem ter uma actuação solitária ou em conjunto. A sua actuação pode levar a um elevado estado de degradação do betão e das armaduras, trazendo graves consequências a nível económico e humano.

O objectivo da presente dissertação centra-se em dar a conhecer factores e mecanismos que levam à corrosão induzida pelos agentes acima mencionados, visto ser fundamental o estudo do seu método de actuação. Porém, é igualmente importante a capacidade de poder diagnosticar o betão, com base em exames laboratoriais e visuais, para que haja uma intervenção especializada sobre a corrosão. Posto isto, o presente trabalho descreve também o processo laboratorial para a quantificação e qualificação das causas que levam à deterioração do betão armado por carbonatação e presença de cloreto, pois através do conhecimento dessas causas torna-se possível estabelecer um plano de reabilitação eficaz.

1.2 Organização da Dissertação

Após o primeiro capítulo onde se faz uma breve introdução à tese, no segundo capítulo trata-se a problemática da durabilidade das estruturas de betão sujeitas a corrosão. Neste capítulo procura-se dar a conhecer o conceito de vida útil de uma estrutura de betão armado.

No capítulo seguinte fazemos a descrição da corrosão e dos diferentes tipos de corrosão existentes no betão armado, encontrando também os processos de deterioração do betão e das armaduras.

No capítulo 4 são relatados os mecanismos, processos e factores que dão origem à corrosão induzida pela carbonatação, dando a conhecer algumas técnicas de cálculo ou de ensaio que permitem quantificar e classificar a carbonatação.

No capítulo 5, é abordada a corrosão induzida pela existência de cloretos. São também referidos os mecanismos e os factores que influenciam o aparecimento e a aceleração dos processos químicos e físicos da penetração dos cloretos no betão armado.

No capítulo seguinte apresentamos a importância do recobrimento como a primeira barreira contra a corrosão, sendo que este é a primeira barreira física contra a penetração de agentes nocivos.

O Capítulo 7 trata das diferentes classes de exposição possíveis e da diferenciação entre estas. O oitavo trata da norma NP EN 1504 “Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão” pois é de extrema importância para uma reabilitação eficaz. A norma introduz processos de reabilitação de acordo com a causa da patologia, daí ser por diversas vezes referenciada.

No penúltimo capítulo são apresentando vários tipos de técnicas de protecção e reabilitação para a corrosão no betão armado. As técnicas apresentadas estão divididas nas seguintes categorias: técnicas electroquímicas, revestimentos, armaduras especiais, inibidores de corrosão.

No capítulo 10 e último, apresenta-se o caso de estudo sobre os muros de suporte do conjunto Habitacional da Palmeira em Câmara de Lobos. Os muros em estudo estão sobre o efeito de corrosão e apresentam inúmeras patologias provenientes da corrosão por carbonatação e presença de cloretos.

2 Durabilidade

A deterioração das estruturas de betão é influenciada pelo transporte de agentes agressivos dissolvidos na água. A rede porosa e as condições ambientais à superfície do betão fazem com que haja maior ou menor facilidade de transporte de agentes nocivos, tais como o dióxido de carbono ou cloretos presentes na atmosfera (Coutinho, 2005).

A água e a humidade existente nos poros do betão e na sua superfície assumem um papel preponderante no desenvolvimento dos processos de deterioração. O transporte de água no interior do betão é afectado pelas características da rede porosa deste: tamanho e tipo de poros, sua distribuição e pela existência de micro e macro fendas. Essas características são os factores mais importantes para que haja resistência ou facilidade de transporte de agentes nocivos (Coutinho, 2005).

O estudo da durabilidade do betão tem vindo a evoluir nos últimos tempos. Tal deve-se ao constante aprofundar dos conhecimentos sobre os mecanismos de transporte através de poros e fendas. O acesso a esse conhecimento permitiu relacionar o factor tempo aos modelos matemáticos que permitem quantificar os mecanismos relacionados com a corrosão deste, fazendo com que seja possível uma avaliação da vida útil de uma estrutura, expressa em número de anos, em função do ambiente a que a estrutura de betão estará sujeita (Coutinho, 2005).

Sendo que o meio ambiente é, também, um dos factores importantes na durabilidade das estruturas de betão armado, é lógico que haja uma necessidade de poder avaliar e classificar o grau de agressividade do ambiente, e conhecer o betão e a estrutura, para estimar a durabilidade e o seu desempenho (Coutinho, 2005).

A durabilidade de uma estrutura de betão armado está inerente à deterioração física, química e/ou biológica do betão, ou da corrosão das armaduras, sendo que a deterioração do betão ou das armaduras pode levar a uma debilitação da estrutura, em termos de resistência e rigidez influenciando a sua durabilidade (Coutinho, 2005).

Hoje em dia, o betão sofre uma separação em termos de durabilidade devido aos meios agressivos. A acção de ácidos, sulfatos, gelo/degelo e à reacção álcalis-agregado que atacam principalmente, do ponto de vista físico, químico e/ou biológico o betão e, posteriormente, as armaduras (Coutinho, 2005).

Relativamente ao ataque das armaduras, os principais agentes agressivos são o dióxido de carbono e os iões cloreto. A carbonatação não tem uma acção directa nas

armaduras sendo que a sua área de acção é o betão porém, leva a que haja uma destruição da película passiva protectora das armaduras, através da diminuição da alcalinidade do betão envolvente. No caso dos cloretos, estes provocam uma perda de secção das armaduras através da dissolução destas em vários produtos provenientes do processo de corrosão que levam não só à perda de secção e, consequentemente, à perda de resistência, como podem também originar destacamentos de áreas de betão através do aumento de volume das armaduras (Coutinho, 2005).

A durabilidade de uma estrutura refere-se ao estado em que esta se comporta como previsto na fase de projecto, durante o período de vida previsto, sem que para tal sejam necessárias manutenção e reparações imprevistas.

Em termos práticos, a durabilidade está ligada à capacidade do betão armado resistir a ataques químicos, ataques provenientes de condições climáticas, ou a qualquer tipo de processo que resulte na deterioração da estrutura.

A norma portuguesa NP EN 1990 relata que a estrutura deve ser projectada para que não haja redução de desempenho ao longo da sua vida útil (Quadro 1), por deterioração, sendo que para tal deve ser tomado em conta o ambiente e o nível de manutenção previsto.

A mesma norma contempla a ideia acima exposta com aspectos que devem ser seguidos para garantir a durabilidade da estrutura, a saber:

- A utilização prevista ou futura da estrutura;
- Os critérios requeridos para o projecto;
- As condições ambientais previstas;
- A composição, as propriedades e o desempenho dos materiais e dos produtos;
- As propriedades do solo;
- A escolha do sistema estrutural;
- A forma dos seus elementos e as disposições construtivas;
- A qualidade da execução e o seu nível de controlo;
- As medidas específicas de protecção;
- A manutenção prevista durante o tempo de vida útil do projecto.

Quadro 1 - Categorias de vida útil previstas na norma EN 1990.

Categoria do tempo de vida útil de projecto	Valor indicativo do tempo de vida útil de projecto (anos)	Exemplos
1	10	Estruturas provisórias ¹⁾
2	10 a 25	Componentes estruturais substituíveis, por exemplo, vigas-carril, apoios
3	15 a 30	Estruturas agrícolas e semelhantes
4	50	Estruturas de edifícios e outras estruturas correntes
5	100	Estruturas de edifícios monumentais, pontes e outras estruturas de engenharia civil
¹⁾ As estruturas ou componentes estruturais que podem ser desmontados, tendo em vista a sua reutilização, não deverão ser considerados como provisório.		

A norma relata que as condições ambientais devem ser identificadas na fase de projecto para que haja a possibilidade de estimar a importância em relação à durabilidade. Deste modo permite que possam ser tomadas medidas para que haja uma protecção efectiva da estrutura (Ferreira, 2000).

2.1 Vida útil das estruturas de betão armado

A vida útil de uma estrutura de betão armado tem como definição a capacidade da estrutura em desempenhar as funções para as quais foi projectada. A metodologia apresentada tem como base a corrosão das armaduras contidas no betão.

O modelo de Tutti (1982) (Figura 1) ilustra o mecanismo de corrosão no betão armado. O processo corrosivo pode ser representado em duas fases: a iniciação e a propagação. A iniciação tem início na fase de execução da estrutura em que o agente agressivo alcança a camada de passivação e ultrapassa-a, deste modo despassivando a mesma. A fase de propagação traduz-se na corrosão até um estado de degradação que coloca em causa a estabilidade ou a viabilidade da estrutura (Coutinho, 2005).

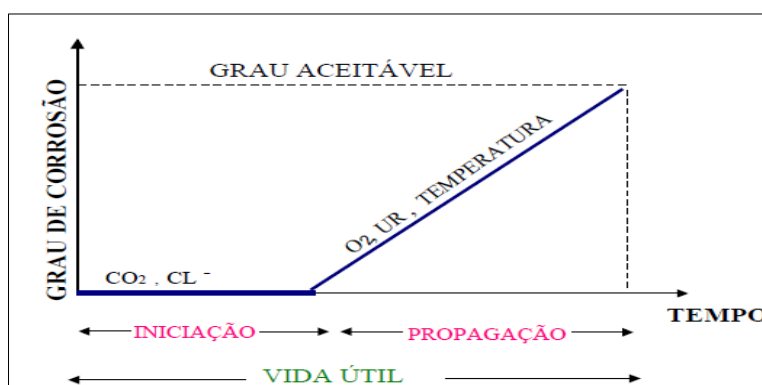


Figura 1 - Modelo de vida útil de Tutti (Coutinho, 2005).

2.1.1 Vida residual

A vida residual de uma estrutura de betão armado pode ser considerada quando o desempenho da estrutura torna-se inaceitável a nível de segurança, de funcionalidade e de estética, requerendo reabilitação que permita repor as condições de segurança, funcionalidade e estética para as quais foi inicialmente projectada (Figura 2) (Coutinho, 2005).

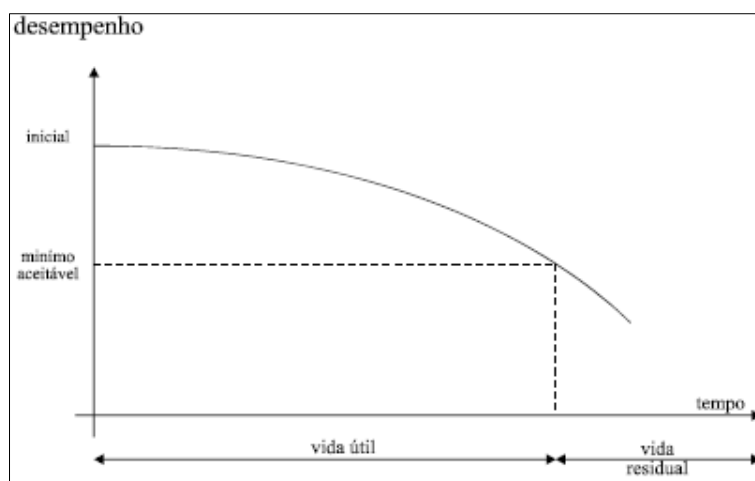


Figura 2 - Vida residual (Coutinho, 2005).

2.1.2 Período de iniciação

O período de iniciação da corrosão tem como conceito o intervalo de tempo que é necessário para que se verifique a destruição da película passivante da armadura. Por norma este fenómeno acontece através da carbonatação do betão de recobrimento e consequente penetração de cloretos até à armadura (Coutinho, 2005).

2.1.3 Período de propagação

O período de propagação caracteriza-se pela evolução da corrosão que faz com que haja um nível elevado de deterioração inaceitável do ponto de vista de segurança, de funcionalidade e estético, que obrigue a uma intervenção de reabilitação sobre a estrutura. Ao considerar o modelo apresentado por Tutti (Figura 1) é possível exprimir a vida útil através da seguinte formulação (Coutinho, 2005):

$$vida\ útil = t_i + t_p \quad eq\ (2.1)$$

Em que : t_i - Tempo de iniciação

t_p - Tempo de propagação

No período de iniciação verifica-se o transporte de substâncias nocivas, como os cloretos, para o interior do betão até às armaduras. Este transporte é facilitado através do aparecimento de carbonatação no betão proveniente de reacções químicas que ocorrem no recobrimento, o que proporciona a propagação de corrosão nas armaduras (Coutinho, 2005).

A qualidade do recobrimento influencia directamente a penetração dos agentes agressivos, tais como cloretos e dióxido de carbono. Tal permite afirmar que o recobrimento tem um papel fundamental no prolongamento do período de iniciação. A qualidade do recobrimento poderá traduzir-se através da sua porosidade e da sua permeabilidade (Coutinho, 2005).

Porém, quando a vida útil da estrutura de betão armado chega ao fim, é necessário proceder-se a reparações com o intuito de prolongar-se a vida útil da estrutura (Figura 3).

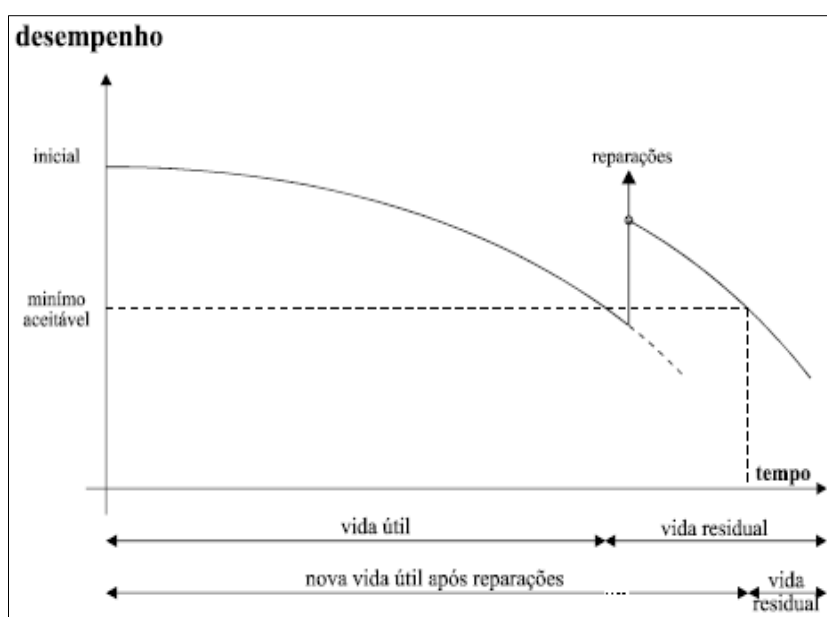


Figura 3 - Vida útil e vida residual (Coutinho, 2005).

Segundo a norma NP EN 1992 a escolha de um betão de durabilidade, tendo em conta a protecção das armaduras contra a corrosão, passa pela análise da composição do betão, o que muitas vezes pode levar a uma preferência de um betão, em que a resistência à compressão seja mais elevada do que a requerida pelo cálculo estrutural.

O seguinte quadro faz a relação entre a classe do betão, a classe de exposição ambiental na norma EN 206, e corrosão.

Quadro 2 - Relação entre as classes de exposição do quadro 4.1 da NP EN 206 e as classes de resistência do betão (EN-1992).

	Classes de exposição de acordo com o quadro 4.1 da norma EN 206									
Corrosão										
	Corrosão induzida por carbonatação				Corrosão induzida por cloretos			Corrosão induzida pelos cloretos da água do mar		
	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3
Classe indicativa de resistência	C20/25	C25/30	C30/37		C30/37		C35/45	C30/37	C35/45	
Danos no Betão										
	Sem risco	Ataque gelo/degelo			Ataque químico					
	X0	XF1	XF2	XF3	XA1	XA2	XA3			
Classe indicativa de resistência	C12/15	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37		C35/45			

3 Corrosão

3.1 Corrosão no betão armado

O betão, através da sua alcalinidade, faz com que o aço envolvido no seu interior se encontre protegido da corrosão. O betão apresenta uma alcalinidade alta, visto o seu pH atingir valores altos na ordem dos 13. Esta característica dá origem à formação de uma camada de óxidos submicroscópica passivante compacta e aderente sobre a superfície da armadura. Se a camada passivante se mantiver intacta, confere às armaduras uma protecção sobre o ataque de agentes nocivos (Simas, 2007).

A carbonatação e a contaminação por cloretos são os principais responsáveis por desencadear mecanismos de corrosão sobre o betão e as armaduras. A presença de cloretos pode servir de catalisador da corrosão sobre as armaduras. A existência de cloretos no betão pode ter origem nas condições ambientais circundantes ao betão armado ou pode ter origem nos inertes usados no fabrico do mesmo (Simas, 2007).

É de salientar que os cloretos podem ter uma actuação sobre o betão mesmo quando este apresenta valores elevados de pH. Quanto à carbonatação, a sua actuação é caracterizada pela diminuição do pH do betão, o que faz com que haja uma diminuição da resistência a compressão (Simas, 2007).

É possível estabelecer, para cada metal, uma ligação entre o potencial de corrosão e o pH, esta ligação pode ser expresso graficamente em diagrama. Este tipo de diagrama é conhecido por Diagrama de Pourbaix (Figura 4) (Simas, 2007).

O Diagrama de Pourbaix resulta de um estudo teórico sobre as possíveis reacções para um metal quando este se encontra num dado meio, sendo que o resultado pode ser inserido em 3 domínios: imunidade, corrosão e passivação (Simas, 2007).

O domínio de “imunidade” refere-se ao facto do metal encontrar-se nas condições correspondentes à sua estabilidade termodinâmica, não sofrendo assim qualquer tipo de corrosão (Simas, 2007).

No estado de “corrosão”, as condições termodinâmicas entre o pH e o potencial electroquímico fazem com que haja instabilidade da camada passivante de óxidos.

No estado de “passivação”, presume-se que o metal encontra-se coberto de uma capa de óxidos que actua como uma barreira protectora impedindo a posterior oxidação.

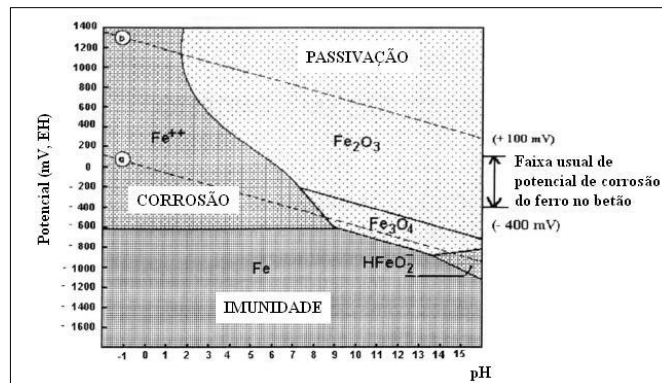


Figura 4 - Diagrama de Pourbaix para o sistema água/ferro a 25°C (Simas, 2007).

Através deste modelo de diagrama de potencial de equilíbrio pH, torna-se possível identificar se um processo de reacção corrosiva é termodinamicamente favorável ou não (Simas, 2007).

A corrosão pode ser abordada de acordo com a sua natureza ou a morfologia resultante do seu aparecimento.

De acordo com a sua natureza, a corrosão pode ser classificado, por química (oxidação ou corrosão seca) ou electroquímica, sendo que esta ultima é por muitos considerada a verdadeira corrosão (Simas, 2007).

A corrosão electroquímica tem um processo que se pode assemelhar como o de uma pilha: na zona onde existe oxidação electroquímica existe um ânodo, um cátodo (onde ocorre a redução electroquímica) e um electrólito (onde circula a corrente iónica). A localização do ânodo cátodo e electrólito encontra-se esquematizada na Figura 5.

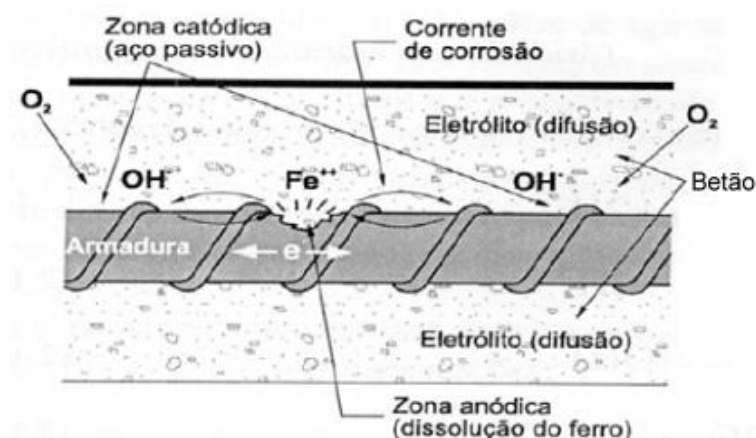


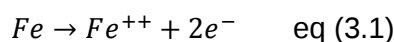
Figura 5 - Representação esquemática da corrosão da armadura (Amaral, 2012).

O electrólito é constituído por uma solução intersticial aquosa que contém iões em solução. Os três elementos acima referidos originam entre si um circuito fechado que, através de uma diferença de potencial, pode levar ao aparecimento de corrosão.

Quando o electrólito contém agentes nocivos, tais como o dióxido de carbono, faz com que haja uma acentuação da diferença de potencial, levando à despassivação das armaduras.

Na zona corroída (zona anódica) verifica-se a dissolução do metal na superfície da armadura e na zona não corroída (zona catódica) verifica-se uma redução do oxigénio. O processo catódico tem origem na fronteira betão/armadura e depende da existência de oxigénio dissolvido e do pH dos dois materiais. A possível existência de fissuras no betão faz com que haja um acesso rápido entre as substâncias agressivas para a armadura dando origem à criação de células de corrosão, como é possível verificar na Figura 6 (Simas, 2007).

- Reacção química responsável pela dissolução do metal a partir da superfície da armadura (Zona anódica)



- Reacção química responsável pela redução de oxigénio na zona catódica

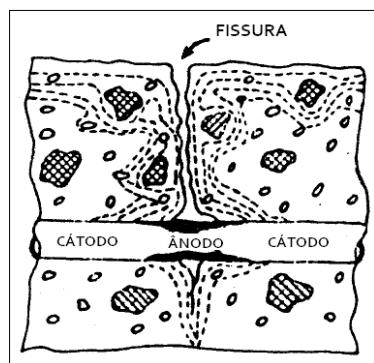
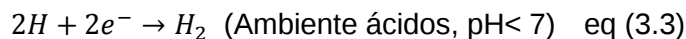
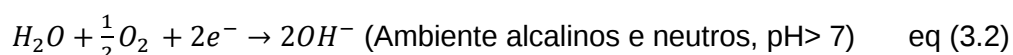


Figura 6 - Corrosão numa fissura (Simas, 2007).

Durante o processo de corrosão verifica-se o aparecimento de produtos derivados da mesma (Figura 7) que originam de óxidos de ferro.

Os produtos resultantes deste processo dependem de factores tais como a temperatura e a relação entre o teor de cloretos e os iões hidroxilo ($[Cl^-]/[OH^-]$).

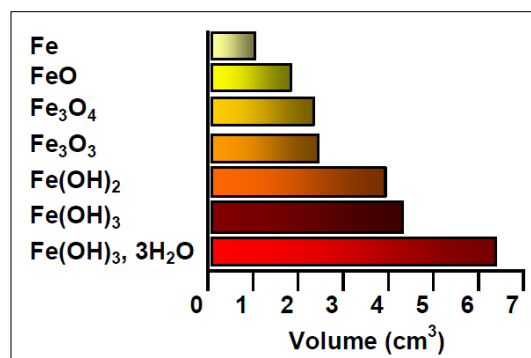


Figura 7 - Volume relativo do produto de corrosão (Polito, 2006).

Os produtos provenientes da corrosão são responsáveis pelo aumento de tensões internas no betão, provocando deste modo fendas, descamação, delaminação e efeitos de canto como é possível observar na Figura 8.

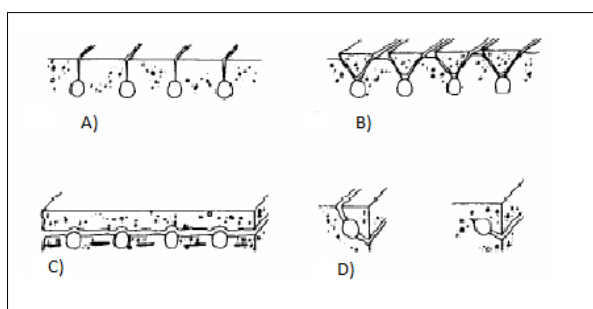


Figura 8 - Efeitos da corrosão da armadura: A)-fendilhação, B)-descamação, C)-delaminação e D)-efeito nos cantos (Coutinho, 2006).

3.2 Formas de corrosão

A corrosão pode ser classificada quanto à natureza do processo e quanto à sua morfologia em: corrosão generalizada, localizada e fissurante. Segundo a sua natureza, a corrosão pode ser classificada em corrosão química ou electroquímica.

Seguindo a classificação da corrosão quanto à morfologia apresentada, a corrosão generalizada deve-se a uma perda da película de passivação que resulta da frente de carbonatação no betão e a consequente penetração de agentes nocivos.

A corrosão generalizada pode assumir um aspecto uniforme, ou seja, pode ser notada em toda a superfície do elemento, ou não uniforme. Em relação à corrosão uniforme, a superfície do betão apresenta-se lisa e regular. No caso da corrosão não uniforme, esta apresenta-se com uma superfície rugosa e irregular (Figura 9). Neste tipo de corrosão existe o perigo de perda das características mecânicas do aço, porém a consequência mais grave é a fissuração proveniente deste tipo de corrosão (Monteiro, 2010).



Figura 9 - Corrosão generalizada num pilar (Minuzzi, 2007).

A corrosão localizada resulta da dissolução localizada da película de passivação. Este tipo de corrosão é geralmente causado pela penetração de iões de cloretos que migram do exterior para o interior, ou de iões de cloretos provenientes de alguns dos componentes usados no fabrico do betão (Monteiro, 2010).

Este processo de corrosão dá-se através da formação de uma célula de corrosão pontual na superfície do aço onde a camada de passivação se encontra intacta deste modo actuando como um cátodo. A área onde houve perda da camada de passivação actua como ânodo e existe uma redução de oxigénio que origina a dissolução do aço.

Quanto à corrosão fissurante, verifica-se, de forma geral em estruturas que se encontram submetidas a elevadas tensões, este tipo de corrosão. Pode apresentar-se através de microfissuras na superfície, que irão progredir rapidamente, resultando numa ruptura brusca e frágil no aço. Este tipo de corrosão tem a particularidade de não apresentar ataques, o que faz com que seja muito perigosa devido ao seu tipo de ruptura já citado (Monteiro, 2010).

Este tipo de corrosão tem maior ocorrência em estruturas pré-esforçadas e também em estruturas de betão armado. Trata-se de um fenómeno de corrosão associado à má qualidade do betão, a bainhas mal preenchidas, à lixiviação do betão ou à presença de agentes nocivos (Monteiro, 2010).

A melhor caracterização deste tipo de corrosão poderá ser de que se trata de uma corrosão que provoca ruptura brusca, sem deformação significativa de elementos estruturais e que não apresenta sintomas visuais de corrosão.

A Figura 10 esquematiza os diferentes tipos de corrosão acima mencionados.

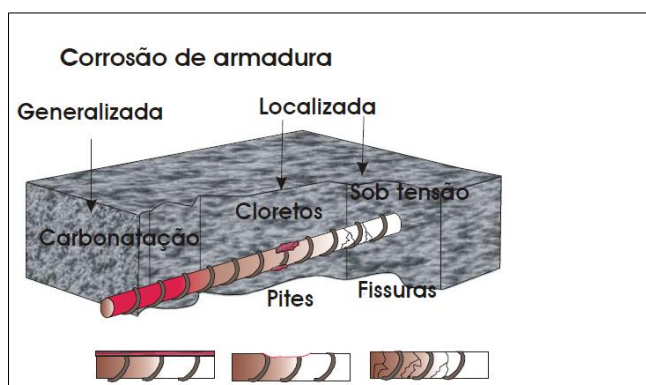


Figura 10 - Tipos de corrosão (Polito, 2006).

Quanto à natureza, a corrosão pode ser classificada como química ou electroquímica. A corrosão química, ou por oxidação, trata-se de um ataque provocado por uma reacção gás-metal que origina uma película de óxidos. Este tipo de corrosão é um processo extremamente lento e não provoca deterioração significativa nas superfícies metálicas.

A corrosão electroquímica é um ataque de natureza electroquímica e dá-se num meio aquoso. Este tipo de corrosão faz com que origine uma pilha, ou uma célula de corrosão, nas armaduras, determinante para que haja corrosão nas armaduras inseridas no betão armado como já referido anteriormente.

3.3 Deterioração por corrosão

A deterioração pode ser definida como uma diminuição das propriedades dos materiais, componentes e elementos da estrutura através de alterações de ordem física ou química.

O betão é um material que se encontra exposto a vários agentes que provocam o seu envelhecimento, levando a uma diminuição no seu desempenho a nível estrutural, estético e funcional (Varela, 2010).

As causas para esse envelhecimento, que resulta na deterioração da estrutura, advêm de diversas acções tais como:

- **Físicas** – a variação de temperatura pode fazer com que haja um choque térmico a nível dos componentes do betão, o que faz com que haja um aparecimento de micro fissuras no betão. Deste modo possibilita uma penetração de agentes nocivos no betão.

- **Químicas** – a estrutura pode estar exposta a substâncias químicas, que podem ser agentes agressivos, tais como o ácido sulfúrico e o ácido clorídrico.

A exposição a essas substâncias resulta numa deterioração de ordem química do betão.

Na maioria dos casos, a água está associada à deterioração das estruturas.

Isto deve-se à facilidade com que se infiltra nos poros do betão, o que faz com que a taxa de deterioração esteja ligada à existência de água no betão.

- **Mecânicas** – as vibrações e erosão podem resultar em fissuras no betão fazendo com que a armadura esteja exposta aos elementos existentes na atmosfera, comprometendo a sua principal protecção.
- **Biológicas** – as bactérias podem produzir ambientes corrosivos, especialmente as oxidantes. O enxofre e o sulfato aceleram a oxidação.

Bhatt e comp (2005), afirmam que a deterioração de estruturas de betão armado, por norma devem-se a uma combinação de factores que têm origem em causas humanas e naturais. As causas humanas têm uma influência directa nas fases de concepção, de projecto, de construção e de utilização. Já as causas naturais advêm de acções químicas, biológicas e físicas.

A degradação apresenta-se, por norma, nas seguintes formas:

- Deterioração do betão;
- Deterioração das armaduras;
- Deterioração de outros elementos.

3.3.1 Deterioração do betão

A deterioração do betão manifesta-se através de fendilhação, desagregação local, defeitos de estanquidade, erosão, alteração do pH, alteração da cor e do aparecimento de manchas e eflorescências (Varela, 2010).

A Figura 11 exemplifica a deterioração superficial e a deterioração expansiva, em que:

- A) Betão sem deterioração
- B) Deterioração superficial
- C) Deterioração expansiva

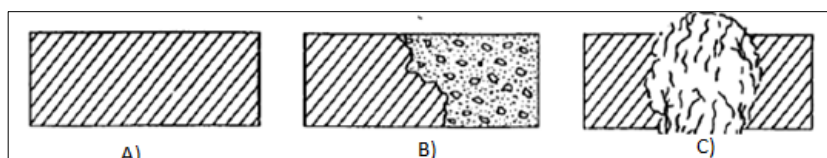


Figura 11 - Representação da deterioração do betão (Varela, 2010).

3.3.2 Deterioração das armaduras

A deterioração das armaduras assume a forma de corrosão, o que pode levar a um destacamento do recobrimento devido ao aumento de volume dos varões que estejam sobre o efeito de corrosão como verificar-se na Figura 12 (Varela, 2010).

- A) Armadura sem corrosão;
- B) Penetração de agentes nocivos que originam a corrosão nas armaduras;
- C) Aumento do volume da armadura, através de produtos derivados do processo de corrosão, que resulta no destacamento da camada de recobrimento;

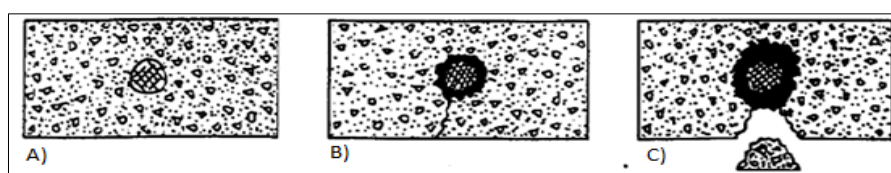


Figura 12 - Representação esquemática da deterioração das armaduras (Varela, 2010).

3.3.3 Deterioração de outros elementos

Existem elementos específicos que podem estar sujeitos a uma deterioração, tais como apoios, articulações e materiais de impermeabilizantes e juntas. A deterioração desses elementos resulta em deformações excessivas, deslocamentos, oscilações e movimentos anormais nos apoios.

3.3.4 Evolução do processo de deterioração

A evolução da corrosão pode ser representada de acordo com Helene (1986), graficamente, como podemos observar na Figura 13:

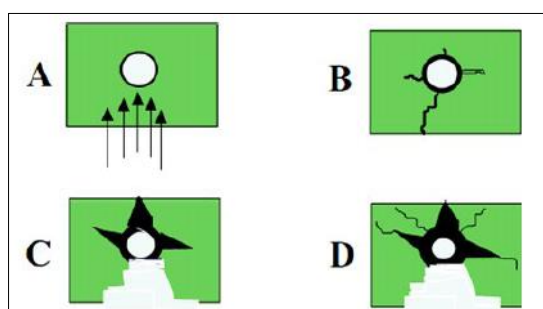


Figura 13 - Evolução do processo de deterioração (Helene, 1986).

Helene (1986) desenvolve as diferentes fases do processo como:

- A) Este período de tempo é caracterizado pela penetração dos agentes nocivos. A penetração dos agentes faz com que se dê início ao processo de despassivação das armaduras.
- B) Esta fase é caracterizada pelo período de tempo entre a despassivação até ao aparecimento de fissuras superficiais. O aparecimento das fissuras deve-se ao aumento do volume das armaduras devido aos produtos de corrosão que se formam em redor dessas estruturas.
- C) Dá-se o destacamento do recobrimento da armadura fazendo com que esta fique exposta, facilitando e acelerando o processo de corrosão. Isto pode resultar na corrosão total da armadura.
- D) Nesta última fase, existe uma perda de secção do aço da ordem dos 25%. Segundo a autora, a perda da secção do aço faz com que a estrutura entre em ruína, porém a autora refere que a partir dos 5% a 10%, a perda de secção provoca danos estéticos e riscos à segurança dos utentes da estrutura.

4 Corrosão induzida pela carbonatação

A carbonatação consiste num processo de extinção da fase líquida intersticial saturada de hidróxido de cálcio e de outros componentes alcalinos hidratados do betão. Este fenómeno é atingido através da difusão do dióxido de carbono para o interior do betão através dos seus poros (Simas, 2007). No seu interior, dão-se reacções químicas com os constituintes sólidos carbonatáveis que, posteriormente, se traduzem num avanço de uma “frente de carbonatação” a partir da superfície do betão. A descida do pH é uma consequência do avanço da carbonatação, sendo que, numa fase sã, o betão apresenta um pH de aproximadamente 13. A carbonatação faz com que haja um abaixamento para valores inferiores a 9, levando a uma despassivação das armaduras permitindo, deste modo, que se instale a corrosão no aço (Figura 14).

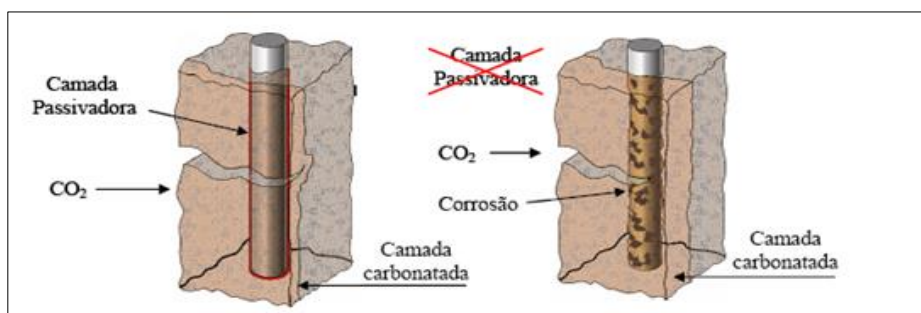


Figura 14 - Representação esquemática do avanço da frente de carbonatação (Varela, 2010).

Os danos provenientes da carbonatação fazem com que haja um acesso facilitado de agentes nocivos presentes na atmosfera às armaduras contidas no betão. A corrosão instalada nas armaduras pode provocar a sua expansão, fissuração e destacamento do recobrimento, perda de aderência e redução significativa da secção das armaduras, como podemos verificar na Figura 15 (Simas, 2007).

O efeito da carbonatação toma contornos negativos nos locais onde o recobrimento é insuficiente. O resultado da corrosão nas armaduras, permitidas pela carbonatação do betão, faz com que haja um aumento de volume de 3 a 10 vezes superior na armadura, devido aos diversos produtos resultantes da corrosão. Isto faz com que haja um aumento de tensões internas que resulta em fissuração na direcção paralela à da armadura corroída. Essa fissuração favorece a penetração de dióxido de carbono, para o interior do betão (Figura 14).



Figura 15 - Destacamento do betão carbonatado após corrosão das armaduras (esquerda). Padrão de fissuração segundo a malha de armaduras, devido à carbonatação (direita) (Simas, 2007).

A difusão é o método de transporte mais importante na penetração do dióxido de carbono no betão. É um fenómeno de transporte de matéria onde o soluto é transportado devido aos movimentos das moléculas de um fluido. Este tipo de movimento leva a que o soluto seja transportado das zonas de maior concentração para as zonas de menor concentração. No caso do dióxido de carbono (CO_2), este penetra para o interior do betão onde reage com os hidróxidos de potássio e de sódio que se encontram na zona intersticial, levando a uma diminuição da sua concentração e a um aumento da solubilidade dos hidróxidos de cálcio (Simas, 2007). Estes reagem com o dióxido de carbono (CO_2), o que leva à formação de carbonato de cálcio. Desta forma, origina-se um processo de difusão do CO_2 (Figura 16).

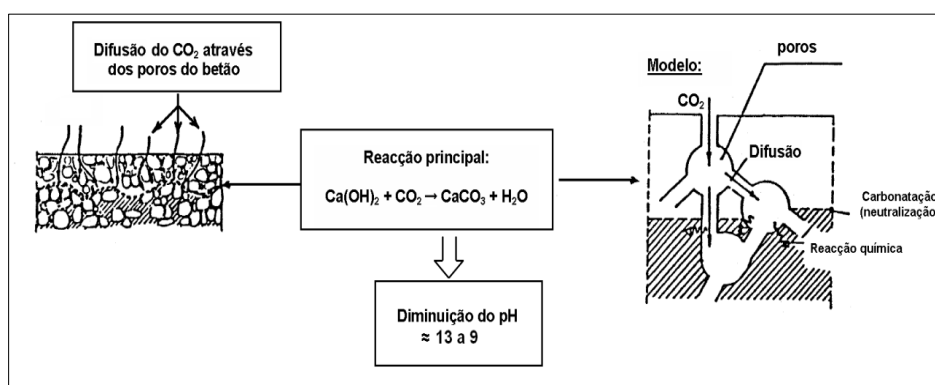


Figura 16 - Avanço do processo de carbonatação (Monteiro, 2010).

A carbonatação, em geral, ocorre lentamente. Isto deve-se às baixas concentrações de CO_2 existentes na atmosfera e também devido ao facto do betão possuir reservas elevadas de hidróxido de cálcio. Essas condições, combinadas com uma baixa permeabilidade, fazem com que haja uma elevada resistência a penetração de CO_2 da parte do betão (Simas, 2007).

4.1 Factores que influenciam a carbonatação

Existem vários factores que podem contribuir para o agravamento da carbonatação, o que faz com que qualquer tipo de previsão da profundidade de carbonatação em estruturas seja difícil de determinar com certeza absoluta.

Os factores que estão directamente ligados à corrosão por carbonatação podem ser classificados de duas formas: factores externos e factores internos (Monteiro,2010).

4.1.1 Factores Externos

Os factores de maior relevância para que haja fenómeno de difusão são a concentração de CO_2 , a temperatura e a humidade relativa do ar. Estes irão determinar o grau de saturação dos poros (Monteiro,2010).

Segundo Kazmierczak (1995), a **concentração de CO_2** é de extrema importância para a velocidade de carbonatação em estruturas de betão, sendo que concentrações elevadas de CO_2 na atmosfera podem levar a um aumento de velocidade de carbonatação. Neville (1992) estabelece uma relação entre o meio e a concentração de CO_2 , sendo que este admite que a concentração de CO_2 pode variar de meio para meio. Deste modo, temos:

- **Meio rural:** 0,03 % em volume;
- **Ambientes urbanos:** 0,10 % em volume;
- **Densa ocupação urbana/industrial:** 0,30 % em volume, podendo atingir 1 %.

Neville (1992), relata que a difusão pode ocorrer em ambientes onde se verifique uma baixa concentração de CO_2 na atmosfera, como ambientes rurais que apresentam um teor de CO_2 de aproximadamente 0,03% em volume.

Em ambientes com características singulares como no caso de armazéns, túneis ou locais com pouca ventilação onde a produção de CO_2 é significativa, os valores podem ser superiores aos apresentados acima.

Nas zonas costeiras os valores de concentração de CO_2 são baixos. Isto deve-se à capacidade do dióxido de carbono ser absorvido pela água.

A **humidade relativa** influencia o processo de carbonatação, sendo que a água exerce um papel importante no processo. A ausência de humidade faz com que o CO_2 penetre nos poros do betão com maior facilidade, porém o processo de carbonatação não é iniciado pois é necessária a dissolução do CO_2 .

Se tivermos uma humidade de 100%, o CO_2 é dissolvido devido à sua baixa taxa de difusão na água. Neste caso a carbonatação é retardada. Para que seja atingida a velocidade máxima de carbonatação, terá que ser atingida uma situação média onde a humidade não é excessivamente alta ou baixa. Nessa situação média é possível que haja em simultâneo difusão e dissolução de CO_2 nos poros do betão, tal como o indica a Figura 17.

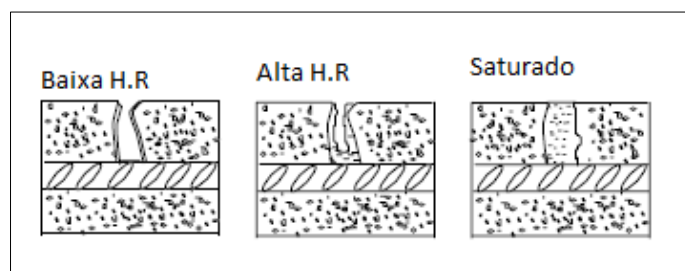


Figura 17 - Conteúdo de água nos poros do betão em função da humidade (Simas, 2007).

Ceukelaire e Nieuwenburg (1993), realizaram uma investigação com o objectivo de avaliar a influência da humidade relativa na profundidade de carbonatação no betão. No ensaio utilizaram diversas variáveis, nomeadamente a concentração de CO_2 (10% e 0,03%) e a humidade relativa entre 40% a 90%. Verificaram que para os vários teores de CO_2 , a carbonatação atingiu profundidade máxima na humidade relativa de aproximadamente 50%, como se pode verificar na Figura 18. Este resultado reforça a ideia já apresentada de que só há difusão e dissolução de CO_2 nos sistemas dos poros numa situação intermédia de humidade relativa.

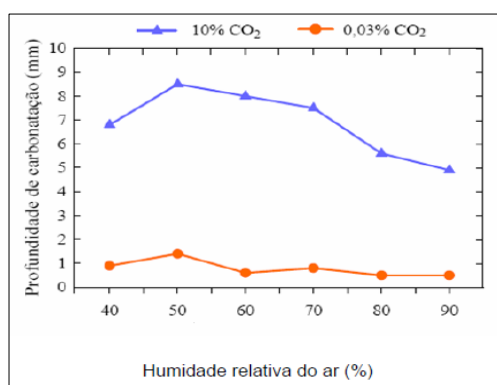


Figura 18 - Profundidade de carbonatação em relação à humidade relativa e o teor de CO_2 (Monteiro, 2010).

A **temperatura** influencia directamente a taxa de reacções químicas de acordo com a teoria de Arrhenius. A difusão e a velocidade de carbonatação aumentam com a temperatura, para tal é necessário que os outros factores mantenham-se constantes. Como tal, para uma temperatura de 20°C a 25°C e HR entre 50 a 70% verifica-se que

a velocidade de carbonatação é elevada. A variação de temperatura e humidade relativa faz com que haja variações na velocidade de carbonatação.

4.1.2 Factores Internos

As características do betão têm muita influência na carbonatação. Podemos destacar a compactação do betão, razão água/cimento, adições activas, fissuras e classe de resistência do betão.

O avanço da profundidade de carbonatação está ligado à compactação e cura do betão, pois estes influenciam as dimensões e as continuidades dos poros que, por sua vez, formam uma rede pela qual o CO₂ penetra (Monteiro,2010).

A **compactação do betão** é de extrema importância pois, se este factor for executado com qualidade, evita a criação de uma camada de recobrimento porosa. Andrade (2002), afirma que uma boa compactação do betão leva a um bom recobrimento das armaduras e promove uma distribuição homogénica dos diferentes agregados que compõem o betão.

Um betão com uma boa compactação tem uma taxa de difusão baixa, levando a uma penetração de CO₂ mais lenta e, por sua vez, tornando o processo mais lento, quando comparado com betões não compactados.

Andrade (2002), relata que quando a **cura** não é feita de maneira correcta há bloqueio e perturbação de determinadas reacções de hidratação, o que leva a um betão poroso muito mais vulnerável, pois permite um acesso mais fácil dos agentes nocivos à armadura, ou seja, quando o tempo de cura é elevado maior será o grau de hidratação do cimento, que por sua vez, proporciona uma menor porosidade e permeabilidade, o que afecta a resistência a carbonatação.

Thomas e Matthews (1992), durante 4 anos avaliaram o efeito da cura e verificaram que esta tem uma influência significativa na redução de profundidade de carbonatação em betões curados em tempos mais elevados. Pela visualização da Figura 19 verifica-se que um betão com uma cura deficiente terá uma maior profundidade de carbonatação.

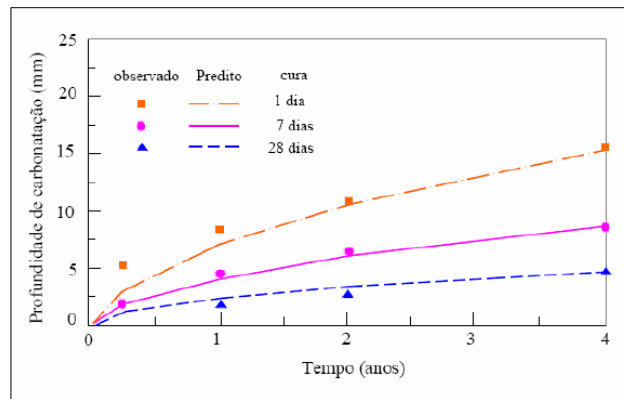


Figura 19 - Influência da cura na profundidade de carbonatação (Monteiro, 2010).).

A **razão entre água e cimento** está ligada à porosidade do betão, sendo que a relação a/c condiciona a quantidade, dimensão e continuidade dos poros no betão endurecido.

A difusão de CO_2 para o interior do betão depende da relação a/c, sendo que quanto maior for a/c, maior será a permeabilidade e porosidade do betão.

Através da Figura 20, é possível constatar que quanto menor for a relação entre água/cimento mais compacto será o betão havendo uma maior resistência à corrosão por carbonatação.

A profundidade de carbonatação está, deste modo, ligada à quantidade de cimento por metro cúbico, ou seja, a profundidade de carbonatação diminui consoante o aumento da quantidade de cimento existente na relação água/cimento.

Esta relação deve-se ao facto do avanço da frente de carbonatação ser inversamente proporcional à reserva alcalina disponível na pasta de cimento hidratada. Esta reserva alcalina está, por sua vez, ligada ao teor de Ca(OH)_2 presente na pasta cimentícia.

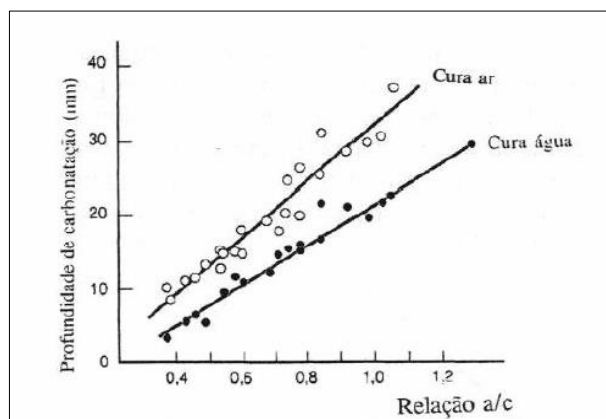


Figura 20 - Efeito da relação água-cimento na profundidade de carbonatação (Monteiro, 2010).

A acção de **adições activas** muda a composição interna do betão. Esta alteração pode conduzir a uma pasta de cimento com menor teor em hidróxido de cálcio. Porém pode levar a modificação da porosidade do betão com um refinamento da estrutura porosa existente no betão. Um dos aspectos negativos consiste na adição de produtos activos que levam a uma menor capacidade de fixação de CO_2 por parte da pasta cimentícia. Dessa forma serão precisas menores quantidades para dar-se início ao processo de carbonatação.

Outro acontecimento possível é a adição de produtos activos que levam a uma redução de difusibilidade do CO_2 , com um abrandamento da penetração.

A adição de cinzas volantes, segundo vários autores, leva a um aumento de velocidade de carbonatação, sendo que as cinzas volantes podem ser caracterizadas de acordo com o baixo ou alto teor de cálcio que é um dos responsáveis pela alcalinidade do betão.

A adição de escórias de alto-forno faz com que o betão tenha uma menor resistência à carbonatação. Este efeito é ainda mais acentuado quando as quantidades aplicadas são da ordem dos 60% a 70%, concluindo-se que a adição de escórias de alto-forno deve ser de baixo valor para que a carbonatação não seja agravada.

Após uma análise às diferentes adições possíveis ao betão, é correcto afirmar que os produtos acima apontados não podem, nem devem, substituir, na sua totalidade, o cimento, uma vez que, quanto maior for a adição, maior é a vulnerabilidade da estrutura a ataque provenientes do exterior e do interior, o que prejudica a durabilidade da estrutura.

A velocidade de carbonatação é influenciada pela fissuração presente na estrutura de betão armado. As **fissuras** advêm de um conjunto de reacções que se propagam a partir da superfície do betão para o seu interior, criando assim um acesso mais rápido para a penetração do CO_2 (Figura 21).

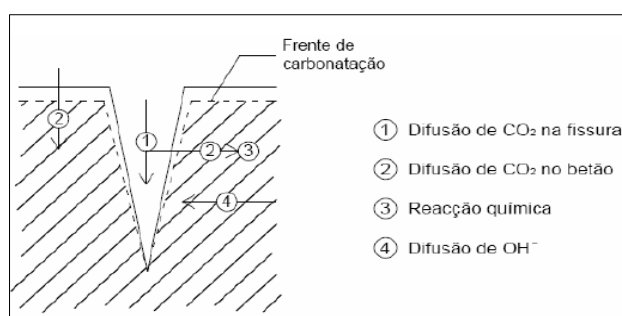


Figura 21 - Representação esquemática da carbonatação no interior de uma fenda (Simas, 2007).

As **fissuras** no betão podem constituir uma grave ameaça. Estas devem ser contempladas na fase de projecto a fim de proporcionar a protecção devida à armadura.

Quanto à abertura de fissuras, parece não haver um entendimento geral a nível de regulamentos internacionais. A NBR 6118 limita a abertura de fissuras de acordo com a agressividade do ambiente. Estas podem variar de 0,2 a 0,4 mm.

O REBAP limita a abertura de fendas em função do meio ambiente em que a estrutura está inserida e as combinações de acção destas podem variar entre 0,1 a 0,3 mm como podemos verificar no Quadro 3.

Quadro 3 - Estados limites de fendilhação para armaduras ordinárias

Ambiente	Combinações de acções	Estado limite
Pouco agressivo	Frequentes	Largura de fendas $w=0,3\text{mm}$
Moderadamente agressivo	Frequentes	Largura de fendas $w=0,2\text{mm}$
Muito agressivo	Raras	Largura de fendas $w=0,1\text{mm}$

Já a norma EN 1992-1-1:2004 faz uma relação de certo modo idêntica ao REBAP, a diferença está no facto da EN 1992-1-1:2004 ter uma especificação para as classes ambientais mais detalhada, fazendo uma maior diferenciação ao nível dos ambientes aos quais a estrutura poderá estar exposta como podemos verificar no Quadro 4.

Quadro 4 - Valores recomendados para abertura de fendas no betão (EN 1992-1-1:2004).

Classe de Exposição	Elementos de betão armado e elementos de betão pré-esforçado com armaduras não aderentes	Elementos de betão pré-esforçado com armaduras aderentes
X0, XC1	Combinação de acções quase permanente	Combinação de acções frequente
XC2, XC3, XC4	0,41	0,2
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3	0,3	0,22
		Descompressão
Nota 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 garantir um aspecto aceitável. Na ausência de especificações no que respeita ao aspecto, este limite pode ser reduzido.		
Nota 2: Para estas classes de exposição deve verificar-se, ainda, a descompressão para a combinação quase-permanente de acções.		

A **classe de resistência do betão** é um factor importante pois, apesar da resistência à compressão do betão não influenciar directamente a carbonatação, tem um papel na velocidade com que a carbonatação ocorre.

Existem diversas fórmulas empíricas que ligam a frente de carbonatação com a resistência característica aos 28 dias. Parrott (1987), propõe a seguinte formulação para o cálculo da profundidade de carbonatação, tendo em conta a classe de resistência do betão:

$$X_c = 125 \exp(-0.05 \times f_{c28}) \quad \text{eq (4.1)}$$

Em que:

X_c - Profundidade de carbonatação (mm)

f_{c28} - Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)

Podemos verificar através da Figura 22 que, com o aumento da classe de betão, temos um aumento da resistência à carbonatação. O conhecimento da relação de carbonatação e da classe de resistência permite definir o tipo de composição e de resistência exigidos para o tipo de exposição previsto (Simas, 2007).

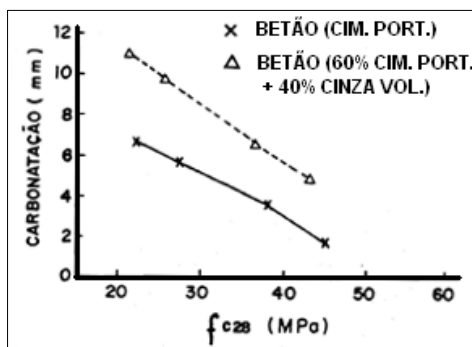


Figura 22 - Influência da resistência à compressão do betão sobre a carbonatação (Simas, 2007).

4.2 Medição da carbonatação

Hoje em dia existe um vasto leque de métodos que permitem identificar e quantificar uma zona de betão que se encontre ou não sobre o efeito de carbonatação. De entre os vários métodos existentes para a determinação de carbonatação, a difracção de raio-X (XRDA), a análise térmica diferencial (DTA), a termogravimetria (TGA) e a espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) são alguns exemplos que fazem recurso à tecnologia mais avançada.

- XRDA - possibilita a determinação da intensidade de distribuição de cristais de Ca(OH)_2 e CaCO_3 ;
- TGA - é um ensaio de carácter quantitativo, permite determinar o valor das concentrações
- DTA - permite verificar as diversas substâncias que constituem a massa cimentícia que são caracterizadas em função da sua temperatura;

- FTIR - este teste fornece-nos um espectro de infravermelho da amostra, que torna possível a determinação do pico das ligações carbono oxigénio presentes nos cristais de CaCO_3 que corresponde à frente de carbonatação

Apesar dos métodos acima indicados apresentarem resultados com elevada fiabilidade e rigor, o método mais usado “in situ” ou em laboratório é a aplicação de indicadores de pH. O indicador mais utilizado é a fenolftaleína, que consiste na preparação de uma solução alcoólica que permite fazer uma leitura da profundidade de carbonatação. O facto de este método ser o mais utilizado prende-se com a sua rapidez, fácil execução e economicidade que permitem fazer a leitura da existência ou não da carbonatação no betão e conhecer a sua profundidade a baixo custo.

A fenolftaleína tem o seu ponto de viragem de coloração coincidente com os valores de pH a que se considera que a carbonatação ocorre. Um betão sem carbonatação apresenta pH na ordem dos 13. A ocorrência de carbonatação no betão tem como consequência um abaixamento de pH para valores da ordem 8,5 a 9. É a partir destes valores que a fenolftaleína passa de uma tonalidade rosa carmim, no caso do betão se encontrar são, para um aspecto incolor quando o betão está sobre o efeito de carbonatação (Figura 23).

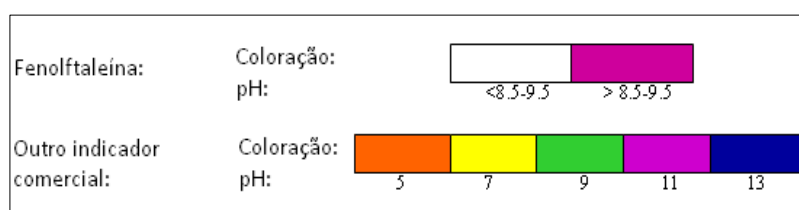


Figura 23 - Dois tipos de indicadores comerciais (Simas, 2007).

A especificação E 391 do LNEC estabelece o procedimento para a estimativa da profundidade de carbonatação. Este documento descreve o processo que consiste em vários passos. Começa-se por extrair a amostra de betão e pulveriza-se com uma solução alcoólica de fenolftaleína a 0,1%. De seguida mede-se na superfície de extracção à profundidade de carbonatação, com uma régua, como se pode ver na Figura 24.

Gentil (2003) relata que a fenolftaleína adquire a coloração róseo-avermelhada para pH igual ou superiores a 9,5. A timolftaleína adquire a coloração azulada em pH igual ou superiores a 10,5. Abaixo desses valores as soluções permanecem incolores.



Figura 24 - Fenolftaleína aplicada a um provete (Polito, 2006).

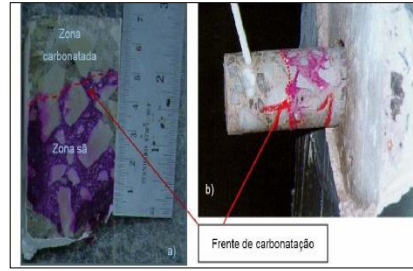


Figura 25 - Medição da frente de carbonatação (Monteiro, 2010).

Em alternativa ao processo acima mencionado, é possível diagnosticar a frente de carbonatação em obra, recorrendo a perfuração do betão através de uma broca, onde o furo é feito a diferentes profundidades, e de seguida é aplicado por aspersão a fenolftaleína para dentro do furo, posteriormente os furos são preenchidos por argamassa (Simas, 2007).

4.3 Modelos de previsão da carbonatação

A presença de dióxido de carbono e de água no meio faz com que ocorra a carbonatação do betão. A velocidade deste fenómeno está ligada à capacidade de penetração e à reacção do CO_2 com a pasta cimentícia com os iões de carbonato.

A difusão é o meio transporte mais eficaz do CO_2 para o interior do betão e, consequentemente, até às armaduras. Este processo consiste no transporte de CO_2 através de um gradiente de concentração, ou seja, o CO_2 existente na atmosfera é consumido na reacção com o hidróxido de cálcio da solução dos poros, originando o carbonato de cálcio e fazendo com que haja a difusão do CO_2 para o interior do betão. Essa penetração irá resultar num abaixamento de pH ou perda de alcalinidade. A perda de alcalinidade por parte do betão faz com que haja uma despassivação das armaduras que originalmente possuíam uma cama de passivação originada pela alcalinidade do betão.

A difusão em regime contínuo pode ser expressa pela primeira lei de Fick:

$$J = D \frac{dc}{dx} \quad \text{eq (4.3)}$$

J consiste no fluxo de dióxido de carbono e iões de carbonato através de uma unidade de área por unidade de tempo, à taxa de variação de concentração molar e é representada através da razão entre, c (concentração) e x (área da superfície) $\left(\frac{dc}{dx}\right)$. D é o coeficiente de difusão que difere de betão para betão, dependendo da

permeabilidade e da porosidade. Para os casos em que o betão apresenta fissuras, este fluxo dá-se pelos capilares e pelas fissuras (Figura 26).

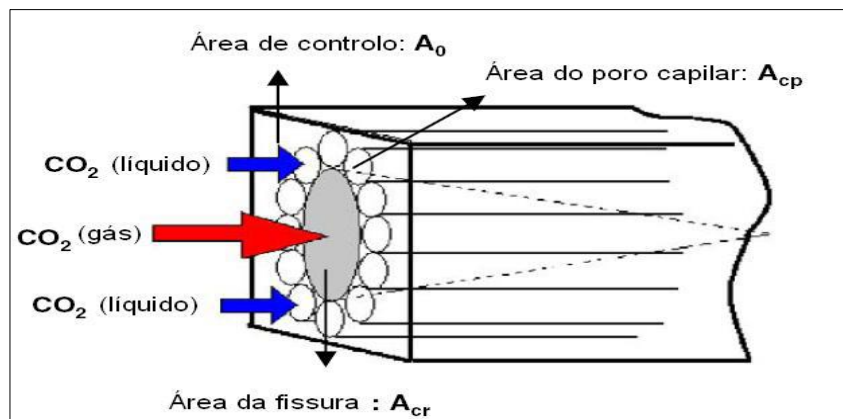


Figura 26 - Difusão de CO₂ através do elemento controlado (Simas, 2007).

A primeira lei de Fick permite quantificar o material alterado. Para a quantificação da profundidade de carbonatação é necessário ter em conta a segunda lei de Fick (Simas, 2007).

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad \text{eq (4.4)}$$

Se for tida em conta a difusão de iões de cálcio para o exterior, esta equação é extremamente difícil de resolver. Outros factores a salientar são a solubilidade e a precipitação, que irão afectar a rede de canais no interior da massa do betão.

Ao longo do tempo, verifica-se o aparecimento de vários modelos, porém estes assentam numa base empírica ou semi-empírica. A criação de um modelo que permita determinar com algum grau de fiabilidade o período de iniciação da corrosão devido à carbonatação, terá grande utilidade (Simas, 2007).

Além dos métodos acima referidos ainda existem ábacos que permitem o cálculo da profundidade de carbonatação de modo mais simples, como por exemplo o monograma (Figura 27) para determinação da profundidade de carbonatação apresentado por Meyer (1987).

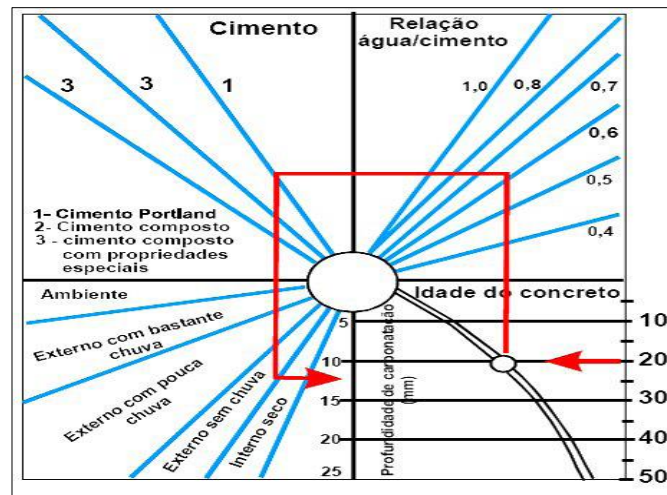


Figura 27 – Ábaco para a determinação da profundidade de carbonatação (Varela, 2010).

Os modelos de previsão da profundidade de carbonatação, assentam quase todos na ideia de que a profundidade de carbonatação é proporcional à raiz quadrada do tempo. De salientar que este raciocínio está de acordo com a 2ª lei de Fick (Simas, 2007).

$$x = K \cdot \sqrt{t} \quad \text{eq (4.6)}$$

Em que:

x - Espessura da carbonatação em mm;
 K - Coeficiente de carbonatação, em mm. Ano;
 t - Tempo de exposição, em anos;

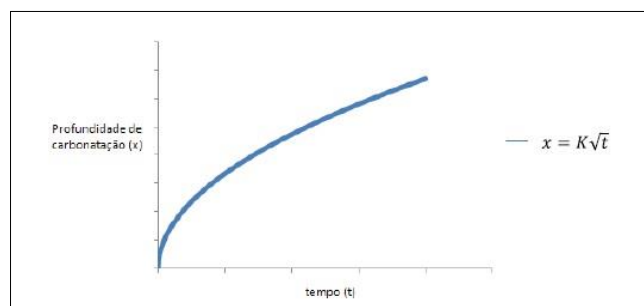


Figura 28 - Profundidade de carbonatação em função do tempo (Simas, 2007).

A profundidade de carbonatação é representada por x , k é o coeficiente de carbonatação, dependendo dos modelos este pode assumir vários valores distintos e t é o tempo de exposição que a estrutura se encontra exposta ao agente agressivo.

Por norma, nos modelos de previsão de carbonatação o valor de k depende de três variáveis principais:

- Quantidade de substâncias do betão passíveis de sofrerem carbonatação, ou alternativamente, a quantidade de dióxido de carbono necessária para que isso ocorra;
- Diferença de concentrações de dióxido de carbono no exterior e na frente de carbonatação;
- Coeficiente de difusão de dióxido de carbono através do betão (fortemente dependente da humidade).

4.3.1 Ensaios acelerados

Os ensaios laboratoriais que envolvem a carbonatação permitem obter acesso a informações de elevada importância no cálculo teórico da profundidade de carbonatação. Porém a maior adversidade encontrada prende-se com o facto de ser difícil simular todas as variáveis existentes no processo natural da carbonatação.

A tentativa de controlar e ajustar todos os factores que podem induzir a carbonatação pode levar à distorção dos resultados, havendo uma discrepância entre os resultados obtidos naturalmente e a comparação com os obtidos pela aceleração do processo de carbonatação. Os valores obtidos em ensaios acelerados podem revelar-se uma mais-valia na fase de projecto e construção de estruturas de betão (Andrade, 2001).

Este tipo de ensaios pode permitir avaliar o coeficiente de carbonatação (K) e consiste na preparação de provetes e exposição dos mesmos numa câmara de carbonatação acelerada, onde parâmetros como temperatura, humidade e teor de dióxido de carbono podem ser controlados. A concentração de dióxido de carbono no interior da câmara é superior à encontrada no meio ambiente, sendo que esta atinge um valor de 5% onde, no meio ambiente, temos uma concentração de 0,03% de dióxido de carbono, sendo que os restantes parâmetros (humidade relativa e temperatura) são mantidos constantes. Em seguida temos uma representação esquemática do funcionamento de uma câmara de carbonatação (Figura 29).

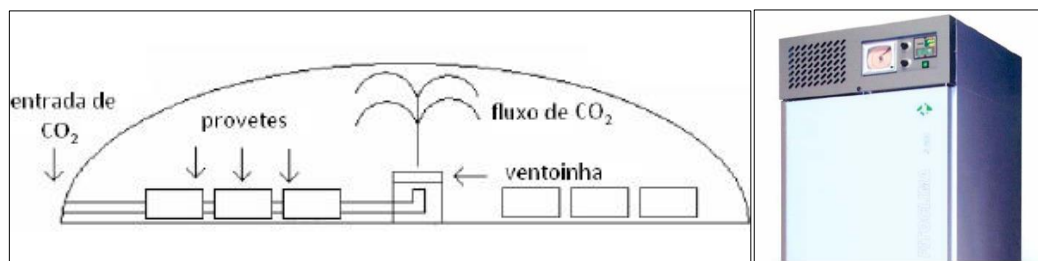


Figura 29 - Representação esquemática de uma câmara de carbonatação (Simas, 2007).

Sendo possível de terminar os valores de K em exposição acelerada (K_a) e em exposição natural (K_n), é possível determinar o quociente entre os dois, podendo deste modo prever o comportamento em ambiente natural (Simas, 2007).

Deste modo temos:

$$X_a = K_a \cdot \sqrt{t_a} \quad \text{eq (4.7)}$$

Em que :

X_a - Profundidade de carbonatação em condições de carbonatação acelerada;

t_a - Tempo até se atingir uma profundidade de carbonatação;

K_a - Coeficiente de carbonatação em condições aceleradas.

$$X_n = K_n \cdot \sqrt{t_n} \quad \text{eq (4.8)}$$

Em que :

X_n - Profundidade de carbonatação em condições de carbonatação de exposição real;

t_n - Tempo até se atingir uma profundidade de carbonatação de exposição real;

K_n - Coeficiente de carbonatação em condições de exposição real.

Através da equação 4.7 e sabendo a relação (K_a / K_n), sendo que para o mesmo valor de penetração $X_a = X_n$, é possível saber a relação existente entre a duração do ensaio e o tempo em ambiente real (4.9 , 4.10).

$$X_a = X_n \quad \text{eq (4.9)}$$

$$\frac{t_n}{t_a} = \left(\frac{k_a}{k_n} \right)^{1/0.5} \quad \text{eq (4.10)}$$

De seguida é apresentado alguns valores que representam o quociente entre o coeficiente de carbonatação acelerado e em exposição natural, sob condições de humidade relativa e teor de dióxido de carbono e temperaturas diferentes (Simas, 2007).

Quadro 5 - Valores do quociente entre o coeficiente de carbonatação acelerada e em exposição natural (Simas, 2007).

Autor	$\frac{k_a}{k_n}$	Exposição acelerada	Exposição natural
Ceukelaire; Nieuwenburg (1992)	7,44	23°C, 50%HR, 4±0,5% CO ₂	23°C, 50%HR, 0,03% CO ₂
Ho; Lewis (1988a)	7,44	20°C, 40%HR, 10% CO ₂	20°C, 40%HR, 0,03%
Bentur; Jaegermann (1992)	7,5	30°C, 50%HR, 5% CO ₂	20°C, 54%HR, 0,03% CO ₂

Ho e Lewis (1987) apresentam uma relação mais conservativa entre o valor de K_a / K_n . Os autores acima referenciados introduzem parâmetros que envolvem o efeito de condições ambientais entre o laboratório e o exterior (β), e o Coeficiente relacionado com a diferença de concentrações de dióxido de carbono (α). Para as condições de 23°C, 50% de humidade relativa e 4% de dióxido de carbono, α pode assumir valores de 7,2 e β pode atingir o valor de 1,4. A introdução destes novos parâmetros pode levar a que os valores do quociente entre o coeficiente de carbonatação laboratorial e exposição natural atinjam valores elevados, porém é preciso ter em consideração que este é um método mais conservativo.

A formulação apresentada por Ho e Lewis (1987), apresenta-se da seguinte forma:

$$k_a = \alpha \cdot \beta \cdot k_n \quad \text{eq (4.11)}$$

Em que:

k_a - Coeficiente de carbonatação em condições aceleradas;

α - Coeficiente relacionado com a diferença de concentrações de dióxido de carbono;

β - Coeficiente de condições ambientais.

5 Corrosão induzida por iões de cloreto

Os cloretos encontrados no betão podem ter a sua origem no processo de fabrico do betão, como por exemplo nos inertes naturais ou na água da amassadura (Amaral, 2012).

Os inertes que são retirados do mar contêm cloretos e sulfatos. Os cloretos em concentrações elevadas não representam uma ameaça à integridade do betão simples, sem armadura, pelo facto de não haver reacções químicas com os compostos de cimento, que possam vir a criar compostos indesejáveis (Amaral, 2012).

Porém, no caso do betão armado, a presença de cloretos acima do valor crítico poderá resultar na corrosão das armaduras (Amaral, 2012).

Além da existência dos cloretos no próprio betão, estes também podem ter origem no meio ambiente, sobretudo em ambientes marítimos. A sua penetração é feita através da rede de poros do betão, que por sua vez permite o contacto entre os cloretos e a armadura.

O tipo de corrosão proveniente deste tipo de acção por parte dos cloretos é localizada, ou por picadas, mas poderá transformar-se numa corrosão uniforme se a rotura da camada de passivação for total, o que por norma, resulta de uma contaminação elevada (Andrade, 2002).

Este tipo de corrosão tem uma velocidade de corrosão que pode oscilar entre os 50 a 500 $\mu\text{m}/\text{ano}$. Essa oscilação depende da qualidade do próprio betão, que irá ditar a facilidade com que os cloretos penetram na sua rede de poros. A corrosão induzida por cloretos pode traduzir-se numa perda significativa de secção nas armaduras (Dugatto, 2006).

Os cloretos como já referido produzem uma corrosão localizada, isto deve-se ao rompimento da camada de passivação e provocando uma corrosão por picada. A picada origina pequenas crateras no aço, essa zona é caracterizada como zona anódica, a sua progressão resulta na perda ou ruptura da secção do aço, a superfície não afectada pela picada transforma-se no cátodo.

Como podemos verificar pela Figura 30, a presença de cloreto à superfície das armaduras provoca a oxidação do ferro. Isto resulta da capacidade dos cloretos para danificar a camada de passivação do aço mesmo em situações onde o meio alcalino seja elevado (Dugatto, 2006).

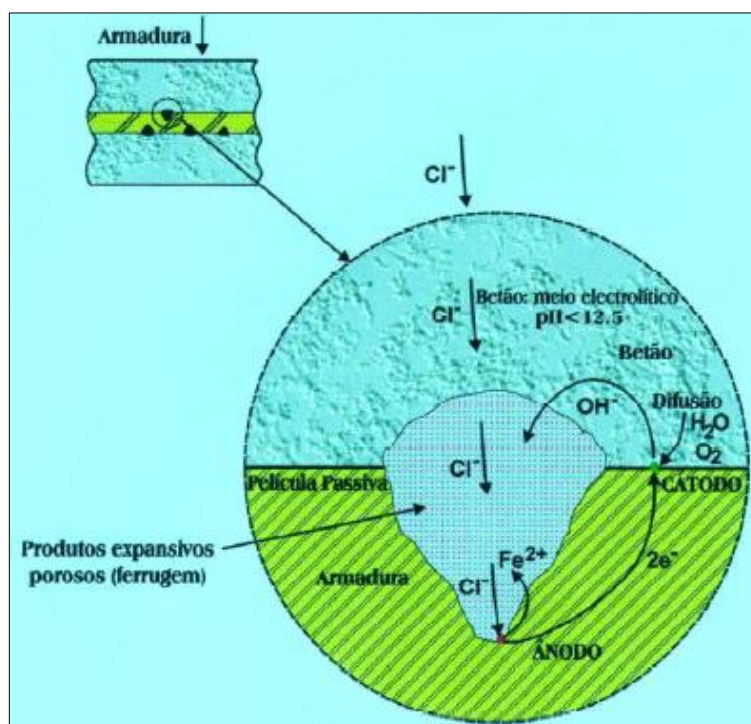
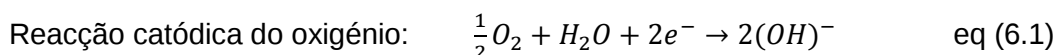
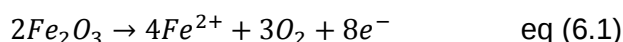


Figura 30 - Corrosão da armadura por "picadas" produzida por cloretos (Amaral, 2012).

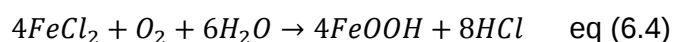
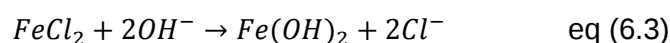
Sandberg (1995) relata que as reacções que permitem a origem de corrosão nas armaduras por cloretos são as seguintes:



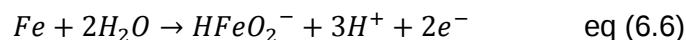
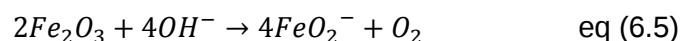
A dissolução do óxido de ferro (Fe_2O_3) na presença de cloretos faz com que os iões de cloreto se combinem com os iões de ferro, dando origem ao cloreto de ferro ($FeCl_2$). Este composto é bastante solúvel na zona de interface aço/betão (Amaral, 2012).



O cloreto de ferro consome os iões hidróxido (OH^-), resultando num abaixamento do pH. Isto origina ainda mais iões de cloreto e de hidróxido de ferro. Devido ao aumento de cloretos na zona onde se iniciou, a corrosão origina a acidificação da picada na presença de iões de cloretos e de oxigénio, deste modo, promovendo a oxidação do Fe (II) para Fe (III) como podemos ver pela equação 6.4 (Amaral, 2012).



Dissolução do óxido de ferro e do ferro:



O efeito catalítico por parte dos iões de cloreto faz com que haja dissolução do óxido de ferro, aparecimento de cloretos de ferro solúvel, difusão dos cloretos de ferro dissolvidos para zonas onde a existência de hidrogénio e oxigénio seja abundante e, por fim, formação de produtos de corrosão. Se o meio ácido for agressivo, os cloretos são libertados, o que leva a um novo ataque por parte destes iões (Amaral, 2012).

5.1 Mecanismos de transporte

O processo de transporte de cloretos para o interior do betão e, consequentemente, até às armaduras, é complexo pois envolve vários mecanismos.

Existem vários factores tais como as condições de exposição, o teor de humidade do betão, a dimensão e constituição da rede porosa que podem influenciar os diversos processos de transporte de cloretos

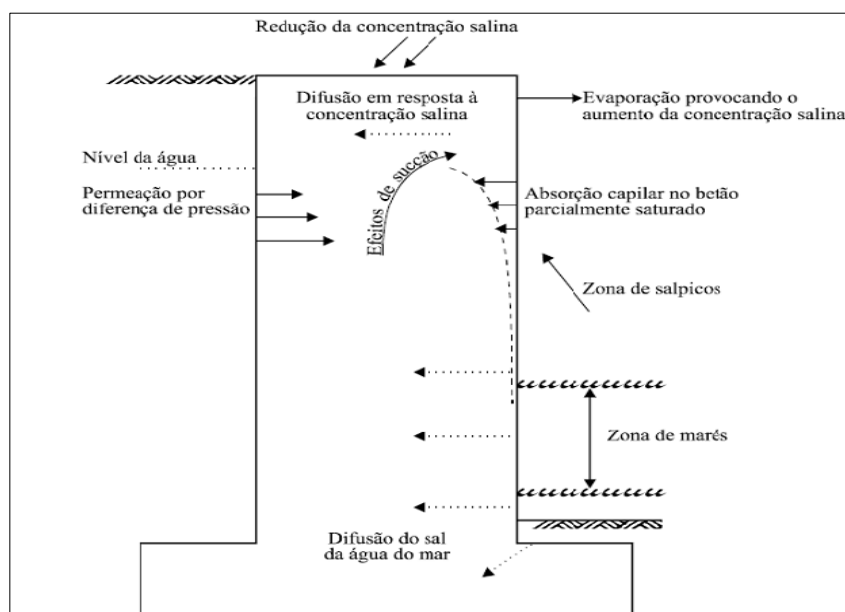


Figura 31 - Mecanismos de transporte numa estrutura de betão em ambiente marítimo (Amaral, 2012).

Como podemos verificar a partir da Figura 31, os mecanismos de transporte de cloretos são permeação, difusão, absorção capilar, migração.

- Permeação - consiste no escoamento de um fluido saturado através de um meio poroso por gradiente de pressão ou por gradiente hidráulico. Este tipo de fenómeno depende da distribuição e tamanho dos poros, e é um processo que se verifica em locais onde a estrutura está em contacto com líquidos sob pressão que, por sua vez, contenham cloretos, como por exemplo o mar (Amaral, 2012).
- Difusão - trata-se de um fenómeno que é originado através da diferença de concentrações. A penetração máxima é verificada nos casos onde o ambiente é saturado. A difusão é o mecanismo predominante na contaminação por cloretos (Amaral, 2012).
- Absorção capilar – este é um fenómeno que ocorre em betões que encontram-se sujeitos a ciclos de molhagem e secagem (Amaral, 2012).
A diferença de pressões entre a superfície livre de água no exterior do betão e a superfície dos poros capilares, faz com que hajam diferenças de pressões que, por sua vez, originam a absorção capilar. Este mecanismo depende da porosidade do betão, pois os poros ligados entre si possibilitam o transporte de líquidos com substâncias nocivas para o interior do betão (Amaral, 2012).
- Migração – a corrente eléctrica electroquímica gera campos eléctricos, originando uma movimentação dos iões para o interior do betão, porém este fenómeno é pouco comum e pode ser observado na técnica de extracção de cloretos por dessalinização (Amaral, 2012).

Para os betões que apresentam uma boa qualidade (compactos, sem fissuras), o meio de transporte mais preponderante é a difusão. Já para betões em que a qualidade é inferior, o mecanismo mais predominante é a absorção (Amaral, 2012).

Nos ciclos de secagem e molhagem alternados, com água contaminada com cloretos, verifica-se que no período de iniciação os cloretos dissolvidos penetram no betão através de absorção capilar.

Já nos períodos de secagem, os cloretos permanecem junto às moléculas de água por absorção, que forma a película que reveste o interior dos poros e, desse modo, dá-se a continuação do processo de difusão.

O período mais intenso verifica-se no período de nova molhagem, onde se verifica a penetração de mais água com cloretos. Estes continuam a ser absorvidos e difundidos aumentando cada vez mais a concentração de cloretos na superfície dos poros (Amaral, 2012).

5.2 Limite crítico de iões de cloreto

O teor crítico de cloretos presente no betão tem sido alvo de estudos ao longo do tempo, com o objectivo de tentar criar normas que possam regular e limitar o teor de cloretos na massa do betão.

Porém, não existe um consenso geral sobre o teor limite de cloretos, abaixo do qual é possível afirmar que não existe ataque às armaduras, pelo facto de existirem variados parâmetros que podem influenciar a corrosão induzida por cloretos no betão armado (Amaral, 2012).

A norma NP EN 206-1, estabelece que deve ser somado o teor de cloretos de todos os agregados utilizados no fabrico do betão, e o teor máximo não deves ultrapassar os limites apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 - Valores máximos do teor de cloretos admitido por massa de cimento (EN 206-1).

Utilização do betão	Classe do teor de cloretos	Máximo de teor de cloretos por massa de cimento	Classe de exposição
Betão simples	Cl 1	1,0%	XC, XF, XA, XS, XD
Com armaduras de aço ou outros metais	Cl 0,2	0,2%	XS, XD
	Cl 0,4	0,4%	XC, XF, XA
Com aço de pré-esforço	Cl 0,1	0,1%	XS, XD
	Cl 0,2	0,2%	XC, XF, XA

A mesma norma estabelece uma classe de teor de cloretos mediante a exposição ambiental como é possível verificar pelo Quadro 6.

A nível internacional verifica-se que o teor crítico de cloretos difere de país, como podemos ver no Quadro 7.

Quadro 7 - Valor limite crítico de cloreto em alguns países (Polito, 2006).

Limite crítico do teor em cloretos % expresso em relação a massa de cimento			
Normas e recomendações	Em massa	Betão armado	Pré-esforçado
Espanhola EH88	1,5 - 2	0,4	
EUROPEIA NP ENV 206 (PORTUGAL)	1,0	0,2-0,4	0,1-0,2
INGLESA BS-8110-1985		0,2 - 0,4	0,1
AMERICANA ACI-318-83		0,15 -0,3 -1**	0,06
*VARIA EM FUNÇÃO DO TIPO DE CIMENTO			
** VARIA EM FUNÇÃO DA AGRESSIVIDADE DO MEIO AMBIENTE			

A dificuldade na apresentação de um valor limite concreto de cloretos onde possamos afirmar que existe corrosão, prende-se com a despassivação das armaduras, pois é difícil quantificar a corrosão necessária para que se possa detectar a despassivação

das armaduras, ou seja, qual o momento a considerar como o início da despassivação da armadura.

Existem dois momentos que é necessário diferenciar: o momento onde se verifica, a despassivação, e o da corrosão activa, que tem início após a rotura do filme de passivação, porém, a corrosão não se verifica num instante mas sim num determinado intervalo de tempo (Amaral, 2012).

O teor crítico de cloretos pode ter três definições convencionais de acordo com o comité técnico TC-235-CTC da RILEM:

- Quantidade de teor crítico de cloretos livres necessários para o rompimento da película de passivação e para o início da corrosão activa;
- Teor de cloretos totais para a iniciação da corrosão por picada;
- Teor de cloretos a qual a armadura é despassivada, sendo que esta definição é mais generalista.

5.3 Factores que influenciam velocidade e penetração por parte dos cloretos

Os factores que influenciam a velocidade e a profundidade de penetração dos iões de cloreto são: o tipo de cimento utilizado no processo de fabrico do betão, a relação água/cimento, a cura, o grau de saturação dos poros e a concentração de iões de cloreto, a existência de fissuras na face do betão, a carbonatação e a temperatura.

O cimento utilizado no processo de fabrico do betão – Polito (2006), refere que a composição, tipo e quantidade de cimento estão ligados à capacidade do cimento em combinar os iões de cloreto com os aluminatos contidos no cimento. Os iões de cloreto são paralisados pelo aluminato de tricálcico existente no cimento através da formação de um sal complexo e insolúvel, o cloro aluminato de cálcio hidratado, (também conhecido por sal de Friedel) diminuindo, desse modo, a concentração de iões de cloreto livres no betão.

Nos cimentos, as adições de escórias de cinzas volantes e microsílicas fazem com que haja um abrandamento da corrosão.

- **Relação água/cimento e cura** – como já citado anteriormente, a relação água/cimento tem uma relação directa na porosidade do betão e, por sua vez, esta propriedade do betão tem influência na penetração dos iões de cloreto. Quanto

maior for esta relação entre a água e o cimento, maior será a porosidade e, consequentemente, menor será a penetração dos agentes nocivos (Figura 32). Gjorg & Vennesland Gjorg (1979), através de pesquisas verificaram que, para longos períodos de exposição, o tipo de cimento é mais determinante na resistência à penetração dos cloretos, quando comparado com a relação água/cimento.

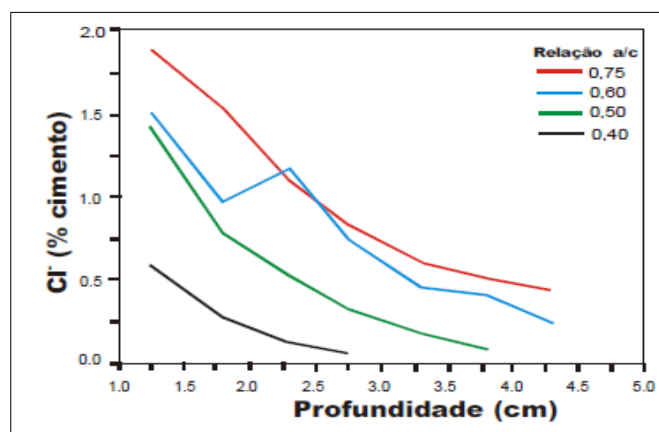


Figura 32 - Efeito da relação água/cimento na penetração de cloretos (Polito, 2006).

- **As condições de cura** - têm influência directa sobre a estrutura de poros. Uma cura correcta permite uma menor difusibilidade efectiva dos iões de cloreto. Um período menor de cura representa uma maior taxa de cloretos e vice-versa, pelo que a diferença entre uma cura maior e menor, reside no facto de, quanto menor a cura, maior a profundidade de penetração dos iões de cloreto. A Figura 33 relaciona a relação água/cimento e cura com o limite de profundidade do betão (Polito, 2006)

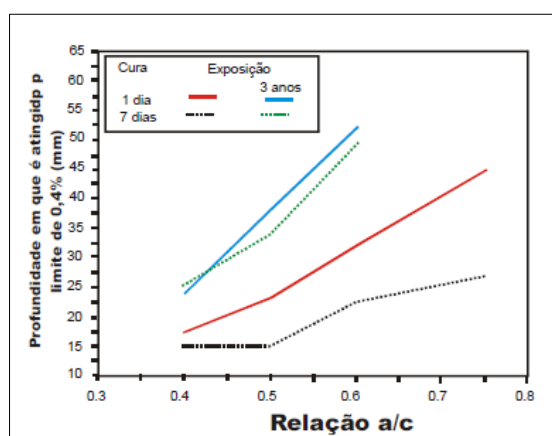


Figura 33 - Efeito da cura e da relação água/cimento na profundidade de alcance dos cloretos (Polito, 2006).

- **Grau de saturação dos poros e concentração de íões de cloreto** - para que haja transporte de íões de cloreto para o interior do betão é necessária a presença de água. Quando se verifica que a água que transporta os cloretos se encontra estagnada, a penetração no interior do betão é feita através de difusão ou por sucção capilar. Este processo verifica-se nos períodos de humedecimento e secagem do betão (Polito, 2006).
- **Fissuras** – o ataque de íões de cloreto nas fissuras dá origem a regiões anódicas no interior destas e a regiões catódicas no seu exterior. A velocidade com que a corrosão se desenvolve depende da abertura da fissura, da qualidade do betão e da relação entre as duas áreas acima descritas, como sendo áreas anódicas e catódicas. Tal leva a deduzir que a possibilidade de haver um ataque por parte de íões de cloreto está ligada ao aparecimento de fissuras (Polito, 2006).
- **Carbonatação** – as estruturas que se encontram sobre o efeito de carbonatação permitem maior rapidez à penetração dos íões de cloreto. O efeito conjunto de carbonatação e íões de cloreto tem consequências mais severas para a estrutura de betão armado em comparação com ataques independentes de íões de cloreto e carbonatação (Polito, 2006).
- **Temperatura** – o aumento da temperatura faz com que haja uma maior mobilidade molecular, o que leva a que o transporte de íões para o interior do betão seja favorecido. Assim, quando a temperatura diminui poderá dar-se condensação e aumento da humidade no betão (Polito, 2006).

5.4 Métodos de medição de teor de cloretos

Os métodos de medição de teor de cloretos presentes no betão consistem em técnicas analíticas por via húmida. Essas técnicas podem ser gravimetria, titulometria, potenciométrica e métodos microanalíticos, como a cromatografia de íões.

O **método gravimétrico** consiste na pesagem da quantidade de cloreto de prata precipitado da solução de cloreto, porém este método não é o mais indicado para valores baixos de teor de cloretos, pois a solução concentrada poderá apresentar outros íões que impurificam o precipitado formado (Pereira e Cincotto, 2001).

A **titulometria ou análise volumétrica** trata-se de uma análise quantitativa, que consiste na medição do volume de uma concentração já previamente conhecida para reagir com os cloretos existentes. A solução conhecida denomina-se solução “padrão” e a sua adição é, geralmente, feita através de uma bureta graduada. O ponto onde se atinge a titulação é conhecido como ponto de equivalência.

O fim da titulação é obtido através da utilização de uma outra substância conhecida como indicador que introduz uma mudança de cor na solução por alterações de concentrações na mistura. O processo de titulação faz com que haja criação de um precipitado, sendo mais fácil de determinar a formação de um precipitado colorido. Uma forma possível de caracterização do processo de titulação é o método de Volhard.

O método de Volhard consiste na precipitação do cloreto através da adição de nitrato de prata. Depois dessa adição é efectuada a titulação do excesso do reagente através do tiocianato de amónio. Como indicador é utilizado o sulfato de amónio de ferro, que permite a observação da mudança de cor da solução formada. A desvantagem apontada a este método é a falta de nitidez na mudança de cor, pelo que este método depende, em muito, da experiência do manuseador na observação da mudança de cor (Pereira e Cincotto, 2001).

A **potenciometria** é outro método que permite a determinação do teor de cloretos existentes no betão. Esta consiste na medição da diferença de potencial entre dois eléctrodos, sendo que um é de referência, ou seja, de potencial conhecido, e outro trata-se de um eléctrodo indicador cujo potencial depende da concentração de uma espécie iónica em solução (Pereira e Cincotto, 2001).

Num potenciómetro, a determinação do teor de cloretos é feita através de um único eléctrodo, indicador, o qual depende do tipo de reacção envolvida. Para que seja possível a determinação do cloreto é utilizado o eléctrodo de cloreto de prata. Assim, origina-se um fio de prata, ou de platina prateado por depósito electrolítico, recoberto com uma fina película de cloreto de prata, imerso numa solução de cloreto de potássio de concentração conhecida, cujo potencial lido depende da concentração de cloreto da solução e permite o seu acompanhamento ao longo da titulação (Pereira e Cincotto, 2001).

6 Recobrimento

O betão representa a primeira barreira contra a carbonatação e penetração de cloretos. Este, quando bem executado, pode impedir a corrosão das armaduras, sendo que essa protecção tem a capacidade de impedir a criação de células electroquímicas.

As armaduras envolvidas por um betão que possua uma boa compacidade, sem segregação, com teor de argamassa adequado e homogéneo, proporcionam uma boa impermeabilidade o que faz com que a protecção das armaduras ao ataque de agentes externos seja mais eficaz (Simas, 2007).

O betão, como já referido anteriormente, apresenta valores de alcalinidade elevados. Devido à sua alcalinidade, promove na superfície do aço uma película de carácter passivo. A alcalinidade acima mencionada é atingida através das reacções de hidratação dos silicatos de cálcio que libertam hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) em valores elevados. O hidróxido de cálcio tem a característica de ser uma base forte pois, este ao dissolver-se na água, preenche os poros e capilares do betão, conferindo ao betão um carácter alcalino, fazendo com que este atinga valores de pH 13 e, deste modo, conferindo uma passivação ao aço (Simas, 2007).

Sendo que o betão de recobrimento desempenha uma função de passivação às armaduras, é seguro dizer que este consiste na primeira barreira de protecção à penetração de dióxido de carbono (Simas, 2007).

A qualidade da protecção acima referida está relacionada com a qualidade do recobrimento. A composição, compactação e cura do betão exerce uma influência directa na qualidade do betão e, conseqüentemente, na protecção às armaduras por parte do betão. A prevenção da corrosão através do recobrimento pode ser feita segundo as normas EN 1992-1-1 e especificação LNEC 464, que fazem a relação entre a agressividade ambiental e a espessura de recobrimento (Simas, 2007).

Segundo a norma EN 1992-1-1 é possível abordar o recobrimento através de uma metodologia prescritiva, onde o recobrimento nominal pode ser calculado através da seguinte equação:

$$C_{nom} = C_{min} + \Delta C_{dev} \quad \text{eq (5.1)}$$

Em que:

C_{nom} - Recobrimento nominal

C_{min} - Recobrimento mínimo

ΔC_{dev} - Tolerância de execução com o valor de 10 mm segundo a NP 13670 -1

$$C_{min} = \max[C_{min,b}; C_{min,dur} + \Delta C_{dur,y} - \Delta C_{dur,st} - \Delta C_{dur,add}; 10mm] \text{ eq (5.2)}$$

Em que:

$C_{min,b}$ - Recobrimento mínimo para os requisitos de aderência;

$C_{min,dur}$ - Recobrimento mínimo relativo as condições ambientais;

$\Delta C_{dur,y}$ - Margem de segurança;

$\Delta C_{dur,st}$ - Redução de recobrimento mínimo;

$\Delta C_{dur,add}$ - Redução do recobrimento mínimo no caso de protecção adicional;

A componente ambiental tida em conta na equação 5.2 através do recobrimento mínimo relativo as condições ambientais (Quadro 8).

Quadro 8 - Valores de recobrimento mínimo, requisitos relativos á durabilidade das armaduras para betão armado de acordo com a EN1992-1:2004.

Classe Estrutural	Requisito ambiental para $C_{min,dur}$ (mm)						
	Classe de Exposição de acordo com o Quadro 4.1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1 / XS1	XD2 / XS2	XD3 / XS3
S1	10	10	10	15	20	35	40
S2	10	10	15	20	25	40	45
S3	10	10	20	25	30	45	50
S4	10	15	25	30	35	50	55
S5	15	20	30	35	40	55	60
S6	20	25	35	40	45	60	65

A mesma norma relata que o recobrimento nominal deve ser especificado nos desenhos, e deve assegurar a transmissão eficaz das forças de aderência, a protecção contra a corrosão, e uma adequada resistência ao fogo.

A espessura do recobrimento afecta a durabilidade do betão, sendo que uma maior espessura de recobrimento resulta num período de vida útil maior (Simas, 2007).

Já Helene (1997) sugere, com base na equação 4.6, a utilização de abacos (Figura 34) para a determinação de recobrimentos de armaduras expostas à carbonatação em função da vida útil do projecto.

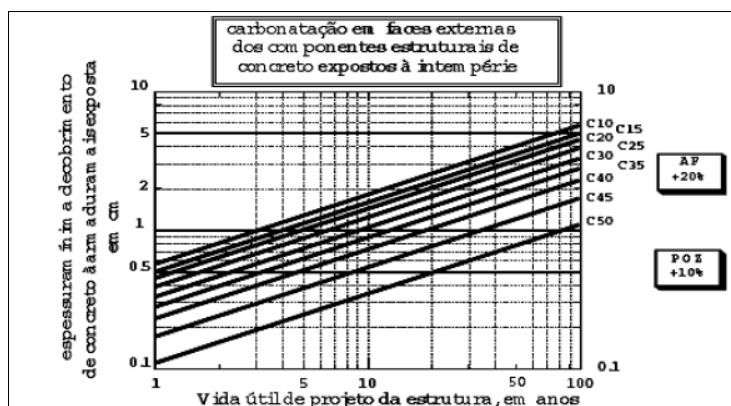


Figura 34 - Ábaco para obtenção da espessura de recobrimento com relação à carbonatação em função do tipo de betão e da vida útil de projecto desejada (Simas, 2007).

7 Classes de Exposição

A norma NP EN 206 especifica que o betão deve incluir a classe de exposição ambiental. Como tal, é da competência do projectista fazer a caracterização dos agentes ambientais e a respectiva classificação.

A norma NP EN 206 reflecte a obrigatoriedade da classificação do betão ao nível da exposição ambiental, onde é referido que, além das acções mecânicas, o projectista deve ter em consideração as condições ambientais a que a estrutura vai estar sujeita durante a sua vida útil, uma vez que estas condicionam a qualidade do betão.

A classificação da exposição ambiental encontra-se estabelecida na NP EN 206-1, mas não exclusivamente. É também possível encontrar esta classificação tanto no NP EN 206-1, como na Especificação do LNEC E 464.

Através da norma NP EN 206-1 podemos concluir que as classes de exposição estão definidas de tal modo:

- **Sem risco de ataque ou corrosão (X0)**
- **Corrosão introduzida por carbonatação (XC)**
 - Betão armado exposto ao ar e humidade.
- **Corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar (XD)**
 - Betão em contacto com água contendo cloretos, incluindo sais descongelantes.
- **Corrosão induzida por cloretos provenientes da água do mar (XS)**
 - Betão armado em contacto com cloretos provenientes do mar.
- **Ataque pelo gelo/degelo (XF)**
 - Betão, enquanto húmido, sujeitado a ciclos de gelo/degelo.
- **Ataque químico (XA)**

Especificando-se, essas classes, conforme o apresentado no Quadro 28 que se encontra em anexo na página 119.

7.1 NP ENV 206 e LNEC E- 464

Em relação ao ambiente, existe a necessidade de classificar a exposição ambiental à qual a estrutura está exposta em relação à durabilidade do betão. As acções químicas ou físicas a que o betão se encontra submetido, resultam de efeitos não contemplados em projecto como acções. Para tal, a norma NP ENV 206 define várias classes de exposição, como é possível verificar no Quadro 28 que se encontra em anexo na página 119. De maneira a se tornar mais claro o processo da aplicação das classes de

exposição ambiental, na norma NP EN206, o LNEC elaborou a especificação E-464, que esclarece a selecção das classes de exposição existente na norma NP EN 206 e fixa as medidas prescritivas que permitem assegurar a vida útil de projecto das estruturas de betão de 50 ou 100 anos nos ambientes correspondentes às diversas classes de exposição.

A especificação E-464 relata que as acções ambientais prevista na norma NP EN 206 estão divididas em 6 grupos, 3 relativos a deterioração do betão por corrosão das amaduras por acção do dióxido de carbono e dos cloretos provenientes da água do mar ou de outras origens, e relativos a deterioração do próprio betão pelo gelo/desgelo ou por ataque químico, e 1 grupo para qual não há risco de corrosão de metais ou ataque ao betão.

Os grupos acima mencionados estão divididos em classes de exposição como já foi referido anteriormente, e são apresentados na norma através de descrição sumária do meio ambiente e de exemplos informativos.

Deste modo é possível encontrar na especificação do LNEC E-464 na forma de quadros prescritivos o Quadro 9 e Quadro 10 servem de exemplo onde estes indicam limites da composição, classe de resistência mínima, dosagem mínima de cimento, recobrimento mínimo e máxima razão entre a/c de modo a garantir a vida útil de projecto das estruturas de acordo com as ameaças ambientais a quais possam vir a estar sujeitos.

Quadro 9 - limites da composição e da classe de resistência do betão sob acção do dióxido de carbono para uma vida útil de 50 anos (LNEC E 464)

Tipo de cimento	CEM I (referência) CEM II/A				CEMII/B; CEM III/A; CEM IV;CEM V/A			
	XC1	XC2	XC3	XC4	XC1	XC2	XC3	XC4
Classe de exposição	XC1	XC2	XC3	XC4	XC1	XC2	XC3	XC4
Mínimo recobrimento nominal	25	35	35	40	25	35	35	40
Máxima razão a/c	0,65	0,65	0,60	0,60	0,65	0,65	0,55	0,55
Mínima dosagem de cimento (kg/m ³)	240	240	280	280	260	260	300	300
Máxima classe de resistência	C25/30	C25/30	C30/37	C25/30	C25/30	C25/30	C30/37	C30/37

Quadro 10 - limites da composição e da classe de resistência do betão sob acção de cloretos para uma vida útil de 50 anos (LNEC E 464)

Tipo de cimento	CEM V/A; CEM IV/B; CEM III/A; CEM III/B; CEM V II/B CEM II/A-D			CEMI; CEM II/A		
Classe de exposição	XS1/XD1	XS2/XD2	XS3/XD3	XS1/XD1	XS2/XD2	XS3/XD3
Mínimo recobrimento nominal	45	50	55	45	50	55
Máxima razão a/c	0.55	0.55	0.45	0.45	0.45	0.40
Mínima dosagem de cimento (kg/m ³)	320	320	340	360	360	380
Máxima classe de resistência	C30/37	C30/37	C35/45	C40/50	C40/50	C50/60

A mesma especificação ainda faz referência que para obter uma vida útil de projecto de 100 anos é preciso proceder alterações no Quadro 9 e Quadro 10 que passam por:

- Nos betões armados ou pré-esforçados sujeitos a acção de dióxido de carbono ou cloretos, o valor de recobrimento nominal é aumentado 10 mm.

De salientar que existe outras considerações apresentadas, porém esta é a única feita em relação a acção do dióxido de carbono e cloretos.

7.2 Combinação de classes de exposição

A norma NP 206 - 1 estabelece que as condições ambientais a que o betão pode estar sujeito podem ser expressas através de uma combinação de classes de exposição e admite que as superfícies existentes num elemento estrutural podem estar sujeitas a várias acções. A especificação E-464, elaborada pelo LNEC, faz várias recomendações tendo em conta as diferentes acções ambientais a que o betão pode estar sujeito.

As recomendações para a combinação de classes de exposição na especificação E-464 são:

- As classes X0 e XC1 por norma são aplicadas isoladas;
- A carbonatação é um processo comum a todas as estruturas de betão, quando há acção dos cloretos, ataques químicos, e ciclos de gelo/desgelo que são específicos em determinados ambientes;
- Na orla marítima devem ser contempladas classes XS. O número de dias com temperaturas negativas (onde se poderiam aplicar as classes XF) não deverá ser

tido em conta. Porém, em zonas interiores onde o total de dias com temperaturas ultrapassa os 30 dias, pode haver combinação de classes XF2 com XD;

- O ataque químico ao betão em fundações, obras de suporte de terras ou em pavimentos que se encontram em contacto com solos dá-se em solos agressivos ou quando o nível freático atinge as fundações com água contaminada. Para tal poderá recorrer-se às combinações mais usuais que se encontram expostas no Quadro 11.

Quadro 11 - Combinações de classe de exposição (LNEC- E- 464).

XC2 com	XC2
	XS2 + 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

Na combinação de classes de exposição ambiental devem ser respeitados os valores de dosagem mínima de cimento na relação água/cimento. Para os casos em que o cimento utilizado não seja comum às diferentes classes usadas na combinação, deve prevalecer aquele que satisfaz a classe com os requisitos mais exigentes.

A Figura 35, exemplifica possíveis combinações segundo o Quadro 11 para zonas interiores e costeiras.

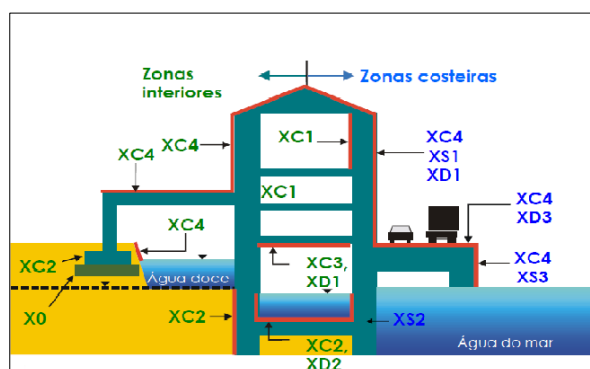


Figura 35 - Combinação de classes de exposição para zonas interiores e zonas costeiras (Cachim, 2012).

8 NP EN 1504 “Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão”

A norma NP EN 1504 encontra-se organizada em dez partes. Na parte n.º1 temos as definições e objectivos da norma. Desde a parte n.º 2 à n.º7 encontram-se os produtos e sistemas que permitem a reabilitação ou reforço da estrutura. As partes n.º8 e n.º10 baseiam-se na avaliação, aplicação e controlo de qualidade. A parte n.º9 contempla os princípios gerais de utilização de produtos e sistemas (Sousa, 2011).

8.1 Princípios da norma EN 1504

A norma EN 1504 estabelece vários sistemas de protecção. Estes podem ser de carácter preventivo ou de reabilitação, que permitem reduzir os processos de deterioração já iniciados. De acordo com o betão e a exposição ambiental, existe um vasto leque de opções de produtos e processos. A parte 9 da norma EN 1504 estabelece uma relação entre opções, factores, requisitos e princípios a considerar de modo a que a intervenção efectuada seja o mais eficaz possível. As opções-base a considerar, de acordo com a norma EN 1504, são as seguintes (Lopes, 2011):

- Não agir durante um certo tempo;
- Reanalisar a capacidade estrutural e, possivelmente, aceitar a inadequação da estrutura para a sua função;
- Prever e reduzir possíveis deteriorações, sem melhoria da estrutura;
- Melhorar, reforçar ou reabilitar total ou parcialmente a estrutura;
- Reconstruir total ou parcialmente a estrutura;
- Demolir total ou parcialmente a estrutura.

Quanto aos factores a ter em conta para a escolha dos produtos a utilizar, são apresentados os seguintes (Lopes, 2011):

- O uso, tempo de vida útil de projecto da estrutura de betão;
- As características requeridas para o correcto desempenho da estrutura;
- O desempenho a longo prazo provável da protecção e da reparação;
- A disponibilidade de oportunidades para protecção, reparação e monitorização adicionais;
- O número e o custo de ciclos de reparação aceitáveis da estrutura durante o seu tempo de vida útil;

- O custo e financiamento das opções de protecção e reparação alternativas, incluindo custos futuros de manutenção e acesso;
- Propriedades e possíveis métodos de preparação do substrato existente;
- A estética da estrutura intervencionada.

Além dos factores acima referidos é igualmente necessário contemplar outros factores relativos à higiene e à segurança, assim como o impacto que as operações de reparo poderão vir a ter nos utentes e ocupantes da estrutura.

Os factores estruturais a ter em conta prendem-se com a possibilidade ou a necessidade de alterações de diferentes acções que poderão actuar na estrutura após a intervenção. Durante a intervenção é necessário contemplar a possibilidade de ter diferentes cargas a actuar na estrutura. Os aspectos ambientais também devem ser analisados, tais como as possíveis mudanças ambientais às quais o betão estará exposto, e a necessidade de protecção do betão face à acção de agentes como poluição, condições climáticas, possibilidade de exposição a um ambiente marítimo, entre outros. No decorrer da intervenção, os métodos de protecção e reparação para estruturas de betão armado deverão respeitar os seguintes requisitos, previstos na norma (Lopes, 2011):

- Ser apropriada ao tipo, à causa ou à combinação de causas e à extensão de defeitos;
- Ser apropriada às condições de serviço futuras;
- Ser apropriada para a opção de protecção e de reparação para a qual foi escolhida;
- Cumprir os princípios presentes na parte 9 da presente norma;
- Recorrer à utilização de sistemas e de produtos que estejam de acordo com as especificações da norma EN1504, ou de qualquer outra norma relevante.

Quanto aos princípios de protecção e de reparação de estruturas de betão armado, estes têm como base leis químicas e físicas que possibilitam a prevenção ou estabilização dos processos de deterioração química e física no betão e no aço das armaduras. Os princípios contidos na norma EN 1504 dividem-se em 2 grupos: problemas relacionados com o betão e corrosão de armaduras. Os princípios referentes às anomalias no betão são (Lopes, 2011):

- Princípio 1 – **Protecção contra o ingresso**, redução do, ou protecção contra o ingresso de agentes desfavoráveis;
- Princípio 2 – **Controlo da humidade**, ajuste e manutenção da humidade contida no betão dentro de um certo intervalo de valores;
- Princípio 3 – **Reparação do betão**, reparação de um elemento de uma estrutura de betão para a sua função e forma inicial ou substituição de uma parte da estrutura;
- Princípio 4 – **Reforço estrutural**, aumento da capacidade de carga do elemento da estrutura de betão;
- Princípio 5 – **Resistência física**, aumento da resistência aos ataques físicos e mecânicos;
- Princípio 6 – **Resistência química**, aumento da resistência superficial do betão aos ataques químicos.

Os princípios referentes à reparação de estruturas degradadas devido à corrosão de armaduras segundo a norma EN 1504 são (Lopes, 2011):

- Princípio 7 – **Preservação ou restauro da passivação**, introdução de condições químicas para que a superfície de reforço seja mantida ou regresse a uma condição passiva;
- Princípio 8 – **Aumento da resistividade**;
- Princípio 9 – **Controlo catódico**, criação de condições em que as potenciais áreas catódicas do reforço, são impossibilitadas de conduzir uma reacção anódica;
- Princípio 10 – **Protecção catódica**;
- Princípio 11 – **Controlo das áreas anódicas**, criação de condições em que as potenciais áreas anódicas de reforço, são impossibilitadas de participar na reacção de corrosão.

De acordo com os princípios acima referidos, a norma EN1504-9 estabelece métodos de reparação e de protecção. O seguinte Quadro 12 indica os métodos de protecção e de reabilitação para anomalias no betão e corrosão de armaduras.

Quadro 12 - Métodos de protecção/reparação de anomalias referentes ao betão e armaduras (Lopes, 2011)

	Princípio	Método de protecção e reparação apropriado	Objectivo
Anomalias no betão	Princípio 1	Impregnação	Protecção contra o ingresso
		Revestimento superficial com ou sem capacidade de suportar movimento de fendas	
		Cobertura local de fendas	
		Injecção de fendas	
		Transformação de fendas em juntas	
		Montagem de painéis externos	
		Aplicação de membranas	
	Princípio 2	Impregnação hidrofóbica	Controlo de humidade
		Revestimento superficial	
		Protecção física ou camada de recobrimento	
		Tratamento electroquímico	
	Princípio 3	Aplicação de argamassa á mão	Reparação do betão
		Aplicação de nova betonagem	
		Betão ou argamassa projectados	
		Substituição de elementos	
	Princípio 4	Adição ou substituição de armaduras internas ou externas	Reforço estrutural
		Fixação de armaduras em furos existentes ou a realizar	
		Fixação de chapas	
		Adição de argamassa ou betão	
		Injecção de fendas, poros ou interstícios	
		Enchimento de fendas, poros ou interstícios	
		Pré-tensão ou Pós-tensão	
	Princípio 5	Camada de recobrimento ou revestimento	Resistência física
		Impregnação	
	Princípio 6	Camada de recobrimento ou revestimento	Resistência química
		Impregnação	
Corrosão das armaduras	Princípio 7	Aumento da cobertura para reforço adicional com argamassa de cimento ou betão	Prevenção ou restauro da Passivação
		Substituição de betão carbonatado ou contaminado	
		Realcalinização electroquímica de betão carbonatado	
		Realcalinização de betão carbonatado por difusão	
		Extracção electroquímica de cloretos do betão	
	Princípio 8	Limitação do teor de humidade através de tratamento de superfície, revestimentos ou protecções físicas	Aumento da resistividade
	Princípio 9	Limitação do teor de oxigénio através de saturação do betão ou revestimento superficial	Controlo catódico
	Princípio 10	Aplicação de potencial eléctrico	Protecção catódica
	Princípio 11	Pintura de reforço com tintas que contenham pigmentos activos	Controlo das áreas anódicas
		Pintura de reforço com tintas que funcionam como barreiras	
		Aplicação de inibidores de corrosão	

9 Métodos de Protecção/Reabilitação

As estruturas de betão armado por vezes são expostas a ambientes ou agentes agressivos que fazem com que o betão e a armadura nele contida estejam sob ataque. Para fazer face a esses ataques, é preciso desenvolver métodos de protecção e até de reabilitação.

Para tal, é necessário conhecerem-se as reacções que estão por detrás desses ataques, para que haja uma melhor compreensão de como proteger ou reabilitar, da melhor maneira, o betão armado.

Gentil (2003) afirma que para um combate eficaz ao processo corrosivo é necessário estudar o processo que o origina e, para tal, temos que ter em conta várias variáveis, tais como a utilização e o meio corrosivo a que o material estará exposto.

Os métodos de protecção podem ser divididos em dois grupos: os que actuam no aço e os que actuam no betão. Andrade (2002) apresenta-os no Quadro 13.

Quadro 13 - Métodos complementares de protecção das armaduras (Andrade, 2002).

Protecção das Armaduras					
Características	Métodos de actuam no aço			Métodos de actuam sobre o betão	
Tipo de método	Protecção catódica	Galvanização	Pinturas epóxis	Aditivos inibidores de corrosão	Pintura epóxis
Campo de aplicação	Qualquer	Ataques por água do mar	Qualquer	Ataques de cloretos, adicionados durante o fabrico	Qualquer
Vantagens	Único método eficaz em corrosão já iniciada	Facilidade de aplicação, sem manutenção	Sem manutenção, eficaz contra corrosão por pite	Fácil aplicação, sem manutenção	Protecção das armaduras e do betão
Desvantagens	Mão-de-obra qualificada, necessita controlo contínuo	Ineficiente na protecção contra corrosão por pite causada pelos cloretos	Aplicação em obra, baixa aderência entre o produto e o aço	Regiões com diferentes susceptibilidades á corrosão	Necessita manutenção, retenção de água nos poros que favorecem a corrosão

Já Gonçalves (2003) sugere outro tipo de divisão, que consiste na divisão através de processos de protecção e divide-os em técnicas electroquímicas, revestimentos, armaduras especiais e inibidores de corrosão, como é possível verificar no Quadro 14.

Quadro 14 - Sistemas de protecção da corrosão das armaduras (Polito, 2006).



9.1 Técnicas electroquímicas

As técnicas electroquímicas de prevenção e reabilitação da corrosão das armaduras no betão armado são técnicas relativamente novas. Estas resultam de uma alteração dos potenciais das armaduras através de um campo eléctrico introduzido.

Estes métodos têm tido uma taxa de elevada eficiência. Estas técnicas têm uma boa aceitação pois têm como sua principal característica um tempo de execução reduzido e garantem um maior tempo de vida útil para o betão armado, o que, por sua vez, se traduz em custos baixos a longo prazo.

As técnicas electroquímicas podem concentrar-se em três métodos electroquímicos para a reabilitação ou protecção do betão armado: a protecção catódica, extracção electroquímica de cloretos e a realcalinização (Polito, 2006).

9.1.1 Protecção catódica

A origem e aplicação do conceito da protecção catódica têm origem no Reino Unido.

Esta é uma solução que se baseia num método electroquímico, que permite uma protecção contra a corrosão nas armaduras, através da alteração do potencial do aço para valores mais negativos. Este processo é conseguido através da aplicação de uma corrente eléctrica, que percorre todo o betão, fazendo com que o aço nele contido passe a funcionar como um cátodo, deste modo reduzindo a corrosão.

Este método permite um retardamento, ou supressão do processo corrosivo que pode estar sobre indução da carbonatação ou por contaminação de cloretos.

A protecção catódica consiste num método electroquímico permanente, ou seja, é um sistema de protecção permanente. Esta protecção tem o seu enquadramento através da norma europeia EN 12696:2000 “Cathodic protection of steel in concrete”.

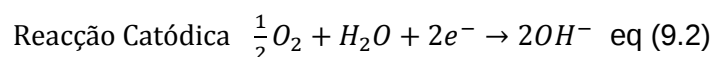
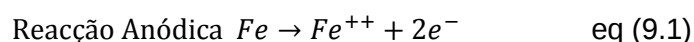
Porém, é importante salientar que a norma acima referida, não abrange estruturas submersas ou enterradas (Silva, 2007).

9.1.1.1 Descrição do processo

Na protecção catódica é estabelecido um fornecimento de electrões às armaduras, através de uma fonte de corrente contínua que tem origem num ânodo aplicado interior ou exteriormente ao betão.

O fornecimento de electrões às armaduras por intermédio de um elemento exterior faz com que o aço adquira um potencial mais negativo, o que resulta numa diminuição de intensidade por parte das reacções anódicas que, por sua vez, leva a um aumento das reacções catódicas. Consequentemente, a corrosão é reduzida (Silva, 2007).

As reacções catódicas e anódicas são dependentes uma da outra, o que faz com que haja uma tentativa de atingir sempre uma situação de equilíbrio entre si.



A protecção catódica é utilizada, por norma, em estruturas que estejam sobre contaminação através de cloretos. Este método faz com que haja uma redução de cloretos existentes na superfície das armaduras. Num sistema de protecção catódica, o cátodo é ligado ao pólo negativo e o ânodo é ligado ao pólo positivo, como possível verificar na Figura 36 (Silva, 2007).

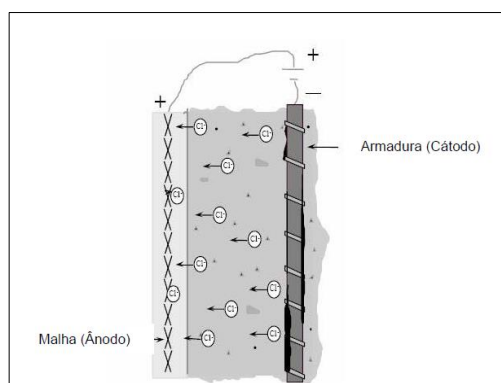


Figura 36 - Esquema da influência sobre os cloretos de um sistema de protecção catódica (Silva, 2007).

Os iões de cloreto estão carregados com cargas negativas, o que faz com que estes sejam atraídos para o ânodo e, por sua vez, faz com que sejam expulsos da superfície das armaduras. A diminuição da taxa de iões de cloretos nas armaduras traduz-se numa promoção da passivação nas armaduras (Silva, 2007).

Quando a estrutura se encontra sobre um ataque através de carbonatação, isto pode fazer com que algumas das características do betão sofram alterações. A resistividade aumenta, fazendo com que haja uma maior dificuldade de distribuição de corrente através do betão, o que faz com que, nesses casos, a aplicação da protecção catódica esteja invisibilizada (Silva, 2007).

O sistema de protecção catódica é constituído por uma fonte de alimentação externa: electrólito que será o betão, as armaduras que assumem o papel de cátodo e um sistema de distribuição que será o ânodo. A ligação do sistema é assegurada por condutores eléctricos na forma de fios e um circuito de monitorização e controlo do sistema.

Para Gentil (2003) a protecção catódica consiste em eliminar, através de um processo artificial, as áreas anódicas superficiais do metal, fazendo com que, ao redor, a estrutura adquira um comportamento catódico que levará a que deixe de existir uma corrente eléctrica ânodo/cátodo.

9.1.1.2 Protecção Catódica Galvânica

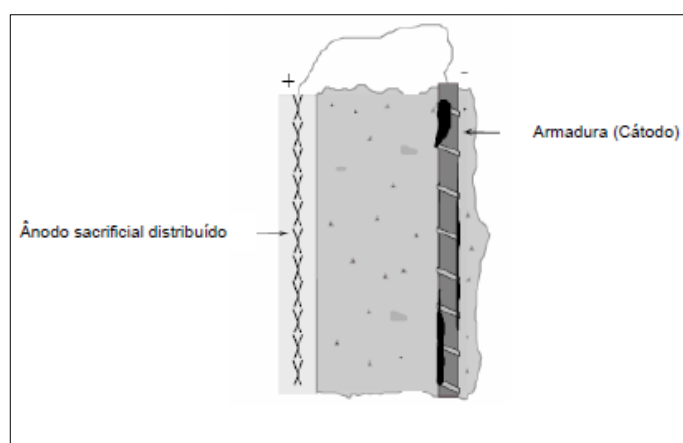


Figura 37 - Esquema de um sistema de protecção catódica com ânodo sacrificial distribuído (Silva, 2007).

O sistema de protecção catódica galvânica consiste na introdução de um metal activo (ânodo), a nível eléctrico, que irá dissipar-se gradualmente ao longo do tempo. O papel de cátodo, por sua vez, é adoptado pela armadura como é possível verificar pela Figura 37, ambos encontram-se no mesmo electrólito.

Este processo baseia-se no conhecimento da série galvânica, que consiste numa lista de metais que se encontram ordenados em ordem dos seus potenciais de oxidação, ou seja, pela facilidade de ocorrência de corrosão (Figura 38). A nobreza dos metais é medida através do potencial positivo do metal: quanto mais alto, mais nobre será o metal e, por sua vez, será mais difícil a este corroer (Silva, 2007).

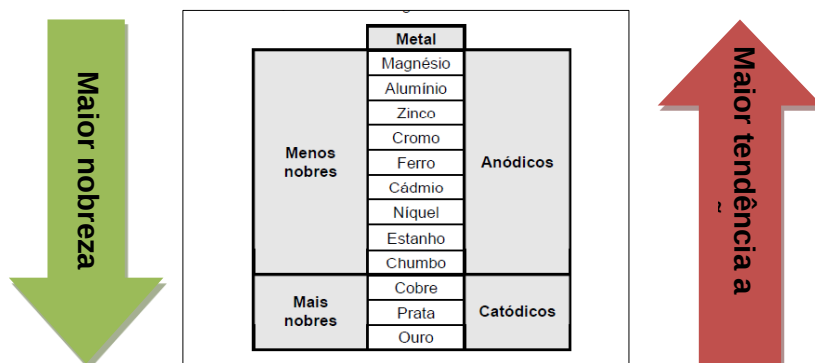


Figura 38 - Série galvânica (Silva, 2007).

Quando existem dois metais inseridos no mesmo electrólito, com potenciais de oxidação diferentes, originam uma corrente eléctrica que é provocada pela diferença de potenciais eléctricos, sendo que o ânodo é o elemento de menor potencial e o cátodo é o de maior potencial (Silva, 2007).

Através de uma análise da tabela de série de galvânica (Figura 38), é possível concluir que a obtenção de um desempenho elevado deste sistema de protecção dependerá, em muito, da escolha do metal para desempenhar o papel de ânodo. Quanto maior for a diferença de potenciais entre os dois metais, melhor será o desempenho da solução.

Neste sistema o ânodo é consumido, logo é fundamental que a sua colocação seja feita num local de fácil acesso para que, mais tarde, isso se traduza numa maior facilidade na troca do ânodo após consumido (Silva, 2007).

Este tipo de sistema, com recurso a um ânodo de sacrifício, tem encargos financeiros mais baixos, comparativamente com os de corrente imposta. A sua principal vantagem prende-se com o facto de não ser necessária uma fonte de energia externa para a produção de corrente usada no sistema, sendo a corrente eléctrica gerada entre os dois metais e de pequena intensidade, não existe perigo na utilização da estrutura por parte dos utentes da mesma.

Um dos lados mais negativos deste sistema prende-se com o facto da voltagem gerada ser baixa, não permitir alteração imediata e apenas ser aplicável em betão com baixa resistividade.

Estes sistemas de protecção catódica promovem o sacrifício do ânodo, fazendo uso do zinco como principal elemento do ânodo. Este metal corrói com alguma facilidade, em relação ao aço utilizado no betão armado, o que faz com que seja o zinco a ser consumido ao longo do tempo, e não o aço das armaduras (Silva, 2007).

Este sistema apresenta como solução um núcleo constituído de zinco que se encontra envolvido em argamassas alcalinas que promovem a corrosão do metal. O sistema está ligado directamente à armadura através de fios de aço que transmitem uma corrente galvânica originada pela corrosão do núcleo de zinco.

Estes fios têm um tempo previsto de utilização de 20 anos, dependendo das condições em que se encontra o betão. Na Figura 39 podemos verificar o processo de montagem deste tipo de ânodo.

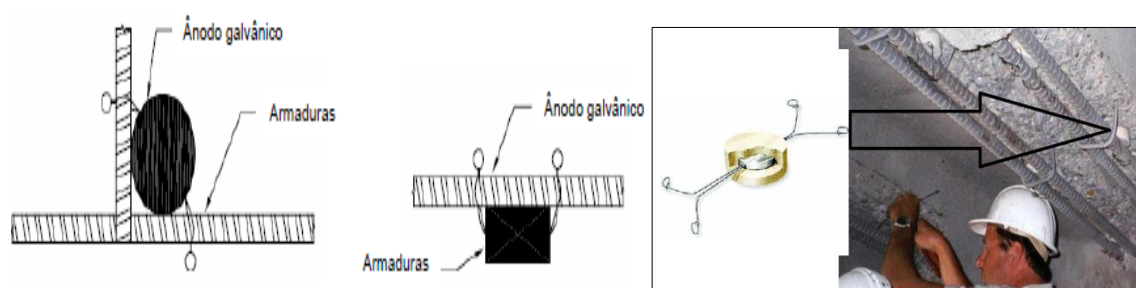


Figura 39 - Ânodo galvânico de zinco (Polito, 2006).

Outra solução, dentro da protecção catódica galvânica, poderá ser o uso de malhas de zinco (Figura 40). Estas são recomendadas para pilares que se encontrem em ambientes marinhos. Aliado às malhas de zinco, poderão ser utilizados encamisamentos de fibra de vidro, que garantem o confinamento da malha. Posteriormente, o espaço vazio entre a malha de zinco e a fibra de vidro é preenchido com uma argamassa cimentícia. Este sistema tem a particularidade de poder ser utilizado em pilares já existentes ou em pilares recém-construídos.

Sendo que este se trata de um sistema pré-fabricado, confere alguma facilidade de aplicação, é de fácil e rápida montagem, não requer manutenção do sistema, tem um vasto leque de opções no que se trata a dimensões e formas geométrica e apresenta uma vida de serviço de 40 anos (Silva, 2007).



Figura 40 - Malha de zinco e colocação dos encamisamentos de fibra de vidro (Silva, 2007).

Outro tipo de ânodos sacrificiais é a projecção de metais directamente nas armaduras da estrutura, onde o betão danificado foi extraído, e nas superfícies vizinhas. Este tipo de ânodos não necessita camada de recobrimento, pois a passivação dos metais seria inútil, a destacar ainda que estes sistemas são adequados para ambientes marítimos.



Figura 41 - Aplicação de metais por projecção sobre uma estrutura de betão armado (Silva, 2007).

Outro método utilizado em estruturas subterrâneas é o de ânodos enterrados de zinco (Figura 42), alumínio e magnésio. Estes devem ser aplicados apenas em estruturas subterradas, devido ao facto de este tipo de solução gerar correntes elevadas comparativamente a outros métodos (Silva, 2007).

Como o próprio nome indica, este processo de protecção catódica consiste em inserir o ânodo no solo. Isso faz com que o electrólito seja muito favorável à passagem de corrente devido à baixa resistividade do solo à corrente gerada (Silva, 2007).

Em geral, os ânodos são ligados à estrutura, após inseridos nos solos. É feita através de um fio metálico que é ligado às armaduras. O contacto entre o ânodo e a armadura é feito através de solda. O ânodo encontra-se envolvido em papel à prova de água e deve ser colocado a uma distância mínima de 1 m da estrutura.

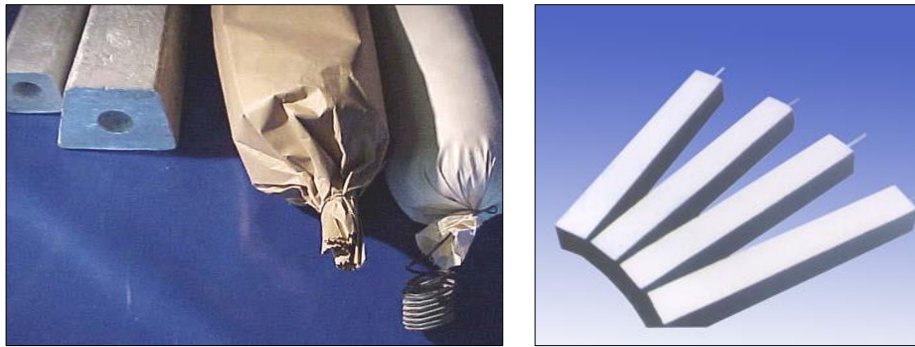


Figura 42 - Ânodos enterrados de magnésio e zinco (Silva, 2007).

Os ânodos de adesivos (Figura 43) são constituídos por películas que apresentam uma espessura de, aproximadamente, 0,25 mm. Estas são coladas sobre o betão. Caso este seja aplicado sobre juntas, aquelas devem ser seladas com silicone para que não haja penetração de humidade entre o betão e a película (Silva, 2007).

Este sistema é de fácil aplicação em obra, não requer mão-de-obra especializada e tem como vantagem o facto de o ânodo estar sempre em contacto com o betão, fazendo com que o betão e o Hydrogel funcionem como o electrólito. A ligação às armaduras é feita através de fios eléctricos que permitem a troca de electrões (Silva, 2007).

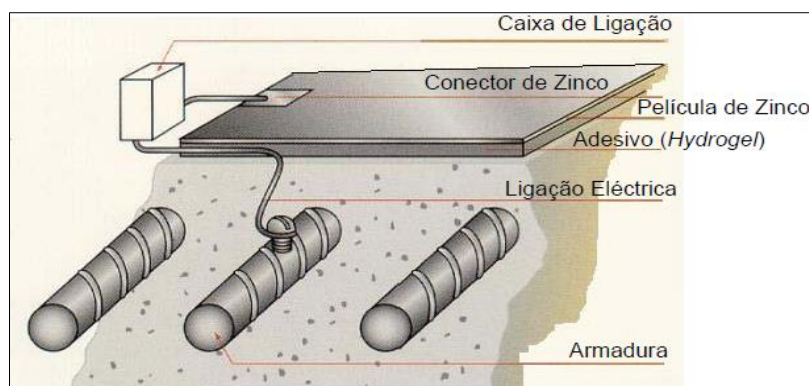


Figura 43 - Instalação esquemática de um sistema de ânodo adesivo de zinco (Silva, 2007).

9.1.1.3 Protecção Catódica por Corrente Imposta

Esta modalidade de protecção catódica por corrente imposta assenta o seu funcionamento em ânodos inertes. Estes não são consumidos ao longo do tempo da sua utilização (Silva, 2007).

Os ânodos inertes necessitam de uma fonte externa de alimentação, que tende a gerar corrente contínua. Ligado à superfície do betão existe um eléctrodo que desempenhará o papel do ânodo. Depois é ligado na fonte de alimentação contínua no

pólo positivo e, de seguida, as armaduras são ligadas ao pólo negativo da fonte de alimentação.

Através da introdução da corrente contínua, este sistema permite que haja uma distribuição mais ampla o que faz com que consiga atingir mais áreas e, por sua vez, tenha uma taxa de sucesso maior (Silva, 2007).

A vantagem deste sistema é a possibilidade de alteração de intensidade fornecida ao circuito, permitindo que hajam compensações de potencial que possam a vir a ser provocadas pela variação de temperatura e de humidade.

A protecção catódica por corrente imposta oferece uma duração de serviço superior a 25 anos. A Figura 44 mostra, de forma esquemática, o sistema de protecção catódica por corrente imposta (Silva, 2007).

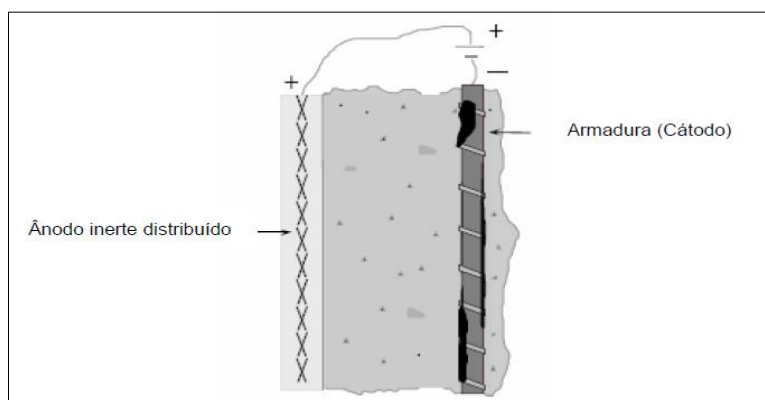


Figura 44 - Sistema de protecção catódica por corrente imposta (Silva, 2007).

Os sistemas de ânodo de correntes impostas podem assumir a forma de malhas de titânio que possuem uma espessura de 1 a 2 mm (Figura 45). Estas devem ser cobertas. Se forem introduzidas na fase de construção do elemento, não necessitam de cobertura, já que estas ficam cobertas com o betão do elemento. Já as fitas de malha de titânio (Figura 46) possuem uma espessura de 10 a 20 mm e esta espessura muda consoante as correntes que serão expostas. A vantagem deste método relativamente às malhas de titânio, está ligado à menor tendência para o aparecimento de problemas de delaminação do betão, além do facto destas possuírem uma elevada durabilidade, a rondar os 40 anos (Silva, 2007).

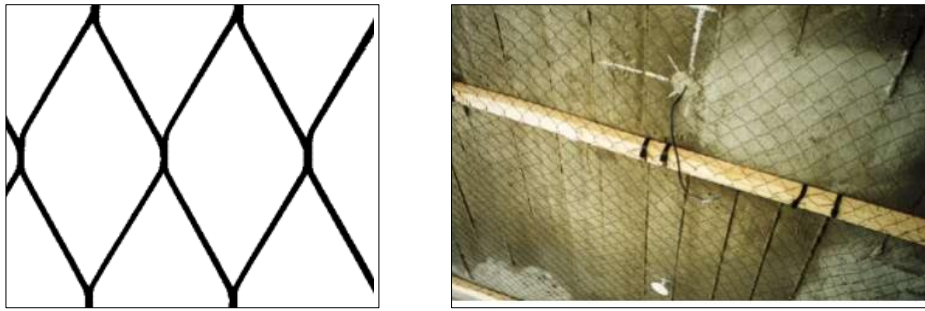


Figura 45 - Malha de titânio para aplicação de protecção catódica (Silva, 2007).

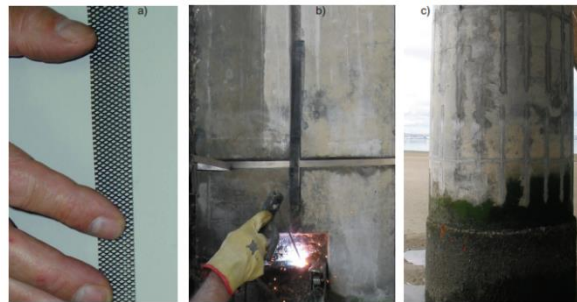


Figura 46 - Fitas de titânio para aplicação de protecção catódica (Lourenço, 2007).

Outro tipo de solução para aplicação de um sistema de protecção catódica poderá ser o de ânodos enterrados de titânio (Figura 47). Esta solução baseia o seu funcionamento na introdução de tubos de titânio revestidos de óxidos de metais nobres no solo. Estes são ligados através de fios condutores ao pólo positivo do rectificador, o que estabelece as ligações anódicas e, de seguida, a armadura é ligada ao pólo negativo, criando a ligação catódica.



Figura 47 - Ânodo de titânio enterrado (Silva, 2007).

A escolha do sistema de protecção catódica a adoptar deve recair sobre a sua facilidade de instalação, o tempo de serviço útil da mesma, os efeitos da instalação do ânodo na estrutura, o tipo de elemento que se procura proteger ou reabilitar e o custo que este sistema pode ter a longo e a curto prazo, sendo certo que este é um sistema que produz dividendos apenas a longo prazo (Silva, 2007).

Os sistemas de protecção catódica por corrente imposta não são os mais apropriados para estruturas não isoladas pois este método tem uma corrente de alta voltagem associada ao seu processo. Esta alta voltagem pode interferir em estruturas próximas, o que poderá levar ao aceleração do processo de corrosão nessas estruturas (Silva, 2007).

Este sistema requer um estudo prévio da resistividade do betão, pois quanto maior for a resistividade do betão pior será a distribuição da corrente, o que leva à aplicação de uma carga maior. O Quadro 15 apresenta uma reflexão entre os dois sistemas de protecção catódica (Dugatto, 2006).

Quadro 15 - Comparação entre os sistemas de protecção catódica (Dugatto, 2006).

Sistemas de PC por corrente imposta	Sistema de PC com ânodos sacrificiais
Diferença de potencial ajustável	Diferença de potencial fixa
Diferença de potencial alta ou baixa	Diferença de potencial baixa
Corrente ajustável	Corrente fixa
Corrente pequena ou grande	Corrente pequena
Custo unitário elevado	Custo unitário reduzido
Custo/m ² protegido baixo	Custo/m ² protegido alto
Custo de manutenção elevados	Custos de manutenção reduzidos
Cuidados de monitorização significativos	Cuidados de monitorização diminutos
Pode originar correntes vagabundas	Inexistência de corrente vagabundo
Aplicável independente da resistividade do betão	Aplicável apenas em betões de baixa resistividade
Pode ser projectado para vida útil bastante longa	Projectado para vida útil limitada

9.1.2 Realcalinização electroquímica

A realcalinização é um dos processos electroquímicos mais recorridos na reabilitação de estruturas de betão armado que sofrem de corrosão nas suas armaduras e betão.

Este método é indicado para situações nas quais as armaduras tenham a sua camada de passividade comprometida devido à acção da carbonatação, o que leva a que a alcalinidade do betão seja afectada. Este é um sistema de corrente imposta de aplicação temporária e este método é regido através de uma pré-norma Pr EN 14038-1 “Electrochemical re-alkalisation and chloride extraction treatments for reinforced concrete – Part 1: Re-alkalisation”.

A realcalinização tem como objectivo o aumento de pH do betão, que pode ser alcançado através de processos electroquímicos, difusão de substâncias alcalinas através de aplicações de reserva álcalis no betão não carbonatado e por absorção por capilaridade de soluções alcalinas (Silva, 2007).

A realcalinização tem como funcionamento a aplicação de um campo eléctrico por um período de tempo limitado. É aplicado às armaduras um eléctrodo, que é inserido no exterior e que se encontra inserido dentro de um electrólito.

Tal como os outros processos electroquímicos de reparação, as armaduras são conectadas ao pólo negativo, que irá ter a função de cátodo, e o eléctrodo externo é conectado ao pólo positivo, que lhe confere a designação de ânodo.

Este método procura o aumento de pH do betão que irá promover o filme passivante de óxido das armaduras que se encontrem danificadas pela acção da carbonatação.

A realcalinização envolve cinco processos: a eléctro-osmose, migração iónica, difusão, absorção por capilaridade e electrólise (Silva, 2007)..

A eléctro-osmose pode caracterizar-se como o movimento de um líquido através de um material poroso, imposto por um campo eléctrico. Este movimento depende das características do betão e do potencial eléctrico aplicado.

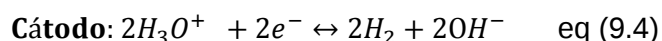
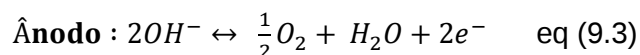
A migração iónica trata-se do deslocamento de iões para fora da área de influência dos elementos associados a uma carga eléctrica semelhante à dos iões, ou seja, os iões de carga negativa afastam-se das armaduras que se encontram conectadas ao pólo negativo e movem-se para junto do ânodo.

A absorção por capilaridade tem como base de funcionamento a migração de substâncias para o interior do betão. Este processo resulta da diferença de pressão existente entre a superfície do betão e o interior dos seus poros, o que origina forças capilares que provocam a movimentação de substâncias para o interior do betão.

A difusão baseia-se também na movimentação de substâncias. Essa movimentação é atingida através de gradientes de concentração, tais como temperatura ou densidade entre o exterior e o interior do betão (Silva, 2007).

O funcionamento da electrólise baseia-se no aparecimento de reacções químicas não espontâneas que são desencadeadas com a passagem da corrente. Estas reacções, que podem ocorrer na área circundante do ânodo e do cátodo, são consideradas as principais catalisadoras da realcalinização.

As reacções que ocorrem no ânodo e no cátodo são as seguintes:



Os efeitos dos cinco processos acima citados fazem com haja um aumento de alcalinidade do betão o que, por sua vez, significa a realcalização do mesmo, fazendo com que o processo de carbonatação diminua.

A combinação de processos faz com que o pH passe para valores entre 10 a 10,8, o que faz com que as armaduras recuperem a sua camada de passivação (Silva, 2007).

O sistema de realcalinização é, de certa forma, semelhante ao da dessalinização, sendo que ambos têm um ânodo externo de cariz temporário colocado na superfície do betão. O ânodo é inserido num electrólito e as armaduras funcionam como o cátodo. Ambos necessitam de uma fonte de corrente imposta associada a um transformador que possibilita a transformação de corrente alternada em corrente contínua de baixa intensidade, e ambos possuem um sistema de monitorização.

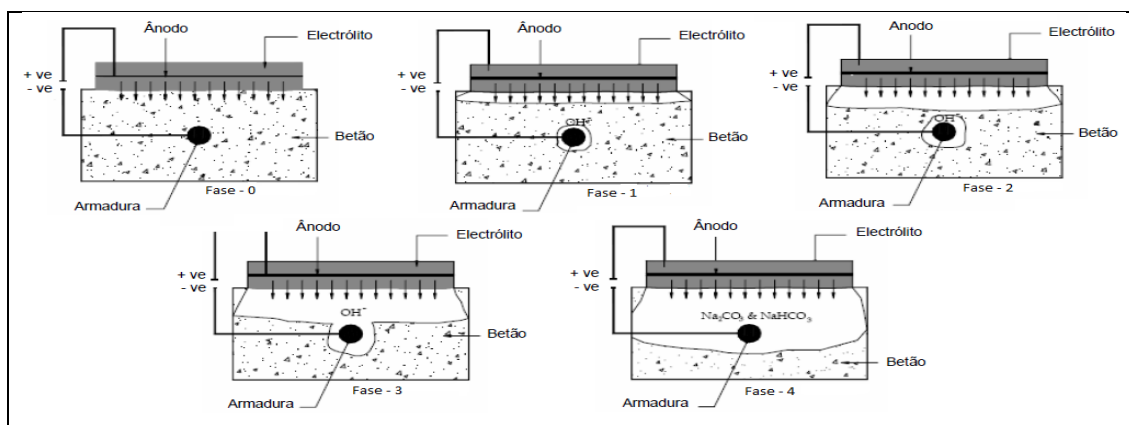


Figura 48 - Evolução do processo da realcalinização (Silva, 2007).

No caso da realcalinização, o ânodo temporário é colocado no betão sendo este embebido numa solução electrolítica que permite a passagem de corrente com características alcalinas. As armaduras, o cátodo e o ânodo estão ligados aos pólos de um transformador que permite que haja um campo eléctrico para que a substância electrolítica que envolve o ânodo seja transportada para o interior do betão pelos cinco processos acima referidos na Figura 48.

- **Fase 0** - fase em que o equipamento foi instalado mas o campo eléctrico ainda não foi accionado. O betão encontra-se carbonatado, após do campo eléctrico, accionando as cinco fases acima referidas e começando o processo.
- **Fase 1,2 e 3** - denota-se o efeito da eléctro-osmose, da difusão e da absorção, que fazem com que o electrólito passe para o interior do betão. Podemos observar a electrólise que origina iões de hidróxido nas imediações da armadura.

- **Fase 4** - verificamos a formação de iões de hidróxido nas imediações das armaduras e a presença do electrólito fazem com que o processo de realcalinização esteja em curso. Podemos ainda destacar a presença dos contra iões de sódio que são oriundos do electrólito que permite a fixação dos iões de hidróxido, que são vitais para que o betão mantenha as suas propriedades alcalinas.

9.1.3 Extracção de Cloretos ou Dessalinização

A extracção de cloretos é um método que se tornou uma alternativa viável à protecção catódica. Como o próprio nome indica, este método tem como objectivo a remoção de cloretos das estruturas que estejam sobre ataque dos mesmos (Silva, 2007).

A sua principal vantagem é que se destina à eliminação do agente agressor e não à mitigação dos sintomas que poderão advir de um ataque de cloretos numa estrutura.

Este método consiste na introdução de um campo eléctrico temporário entre as armaduras e um eléctrodo exterior, o que faz com que haja uma migração de iões de cloreto para fora do betão. Deste modo, temos eliminação completa através de processos electroquímicos dos iões de cloreto sobre as armaduras (Silva, 2007).

É um processo que tem algumas semelhanças ao processo de protecção e reabilitação por sistema catódico. Ao contrário dos sistemas catódicos, a extracção de cloretos não tem nenhuma referência de norma europeia, sendo que a protecção catódica se encontra orientada através da norma europeia EN 12696:2000 "Cathodic protection of steel in concrete".

Como referido anteriormente, o processo de remoção de cloretos ou dessalinização tem um funcionamento com algumas semelhanças aos processos e protecção catódica. Este consiste na aplicação de um campo eléctrico entre as armaduras e de um ânodo colocado no exterior do betão. O ânodo encontra-se sobre uma solução electrolítica que é aplicada na superfície do betão, o que faz com que hajam determinados processos de origem electroquímica que levam à eliminação dos iões de cloreto. Outro resultado destes processos electroquímicos é o facto de estes promoverem a formação de iões de hidróxido que fazem com que a alcalinidade do betão aumente, o que, por consequência, provoca uma repassivação às armaduras afectadas (Silva, 2007).

Em termos de duração este é um método que se destaca pelo facto da aplicação do ânodo e a corrente eléctrica não serem permanentes.

A ligação à corrente é feita através de uma ligação entre as armaduras ao pólo negativo enquanto o ânodo externo é ligado ao pólo positivo, acoplado à superfície do betão. A polarização das armaduras faz com que estas funcionem como um cátodo dando, deste modo, origem a um campo eléctrico que, por sua vez, irá criar diferença de potenciais entre o ânodo e o cátodo. Esta diferença de potenciais irá criar processo electroquímicos, nomeadamente a electrólise e a migração iónica.

A migração iónica pode-se traduzir-se no facto de que os iões que se encontram sobre acção do campo eléctrico estão obrigados a uma movimentação para o exterior do betão. Este deslocamento forçado deve-se ao facto dos iões serem repelidos das zonas de carga eléctrica semelhantes à sua.

A dessalinização pode ser vista como um processo de expulsão de iões de cloreto das armaduras para a face exterior do betão. Com isto, levam a um aumento de pH que irá fornecer às armaduras uma camada de passivação.

A electrólise poderá ser vista como um modo de transformar substâncias por oxidação ou por redução através de uma conversão de energia eléctrica em energia química. Esta conversão leva à formação de elementos que promovem, através de reacções electroquímicas, a redução do nível de cátodo, o que leva ao aumento da alcalinidade do betão.

A dessalinização é apropriada para estruturas que estejam sujeitas a pequenos salpicos de água do mar, no entanto este método não pode ser aplicado nos casos em que este esteja em contacto com a água de forma permanente, nem quando a deterioração do betão se encontra em estado elevado.

A presença dos iões de cloreto pode ser feita a longo da vida útil da estrutura e também pela contaminação da amassadura e dos agregados. Estes iões, que se encontram no betão, estão sobre a forma de iões livres nos poros existentes no betão, ao longo da dessalinização. No seu estado livre funcionam como promotores do processo de corrosão, estes sofrem uma migração iónica.

A extracção de cloretos também faz com que as ligações entre os iões combinados se destruam. Isto é conseguido através do facto de que os iões livres e combinados encontram-se em equilíbrio e a sua destruição, numa primeira fase, faz com os iões compostos se libertem de forma a tentar encontrar uma nova situação de equilíbrio.

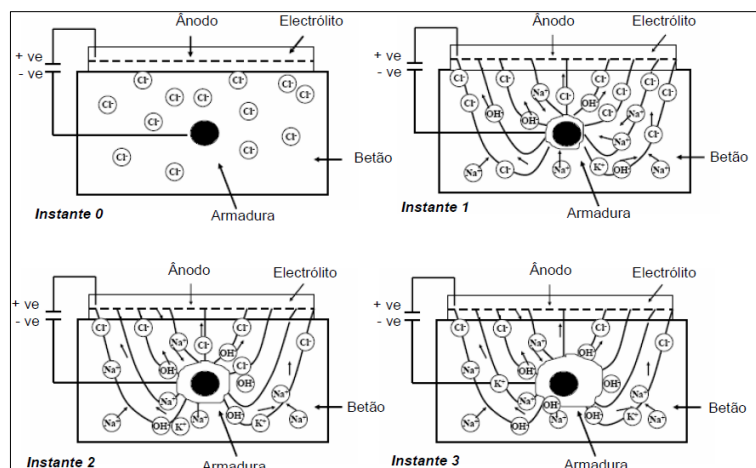


Figura 49 - Evolução da dessalinização (Silva, 2007).

Através de uma reflexão sobre a figura acima apresentada, é notório que os íons de cloreto que se encontram com carga negativa se desloquem no sentido do ânodo, e os íons de sódio e de potássio, que agem como contra íons, se desloquem para junto das armaduras. Estes permitem que os íons de hidróxido se fixem promovendo assim a criação de uma nova camada de passivação (Silva, 2007).

9.2 Revestimentos

Os revestimentos podem ser aplicados na superfície das armaduras ou no betão. Podem ter compostos metálicos mais resistentes, ou podem ter uma constituição orgânica com uma base de epóxi.

9.2.1 Revestimentos Superficiais

A norma EN 1504-2 caracteriza o revestimento superficial como um tipo de tratamento que fornece ao betão armado uma protecção física adicional e contínua contra o ingresso de agentes agressivos em toda a sua superfície (Figura 50). Esta protecção é atingida através de uma película de espessura compreendida entre 0,1mm a 0,5mm (Santana, 2012).

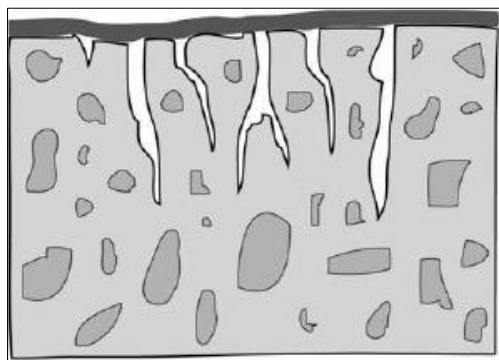


Figura 50 - Representação esquemática de um revestimento superficial (Santana, 2012).

Os revestimentos superficiais podem ser distinguidos em três categorias distintas:

- **Revestimentos por pintura** - este tipo de revestimento oferece uma variedade de opções quanto à durabilidade e à capacidade de protecção. Estes dependem da formulação e tipo de ligante usado, que pode variar entre poliuretanos, borracha clorada, acrílicos e epoxídicos. A espessura geralmente aplicada encontra-se entre 0,1mm e 1mm (Santana, 2012);
- **Revestimentos de ligantes minerais e mistos** – têm um método de actuação semelhante aos revestimentos por pintura, têm espessuras possíveis superiores a 5mm e conferem uma boa resistência a radiação ultravioleta (Santana, 2012);
- **Membranas** – aplicadas, por norma, em condições de serviço severas, têm na sua constituição materiais de base polimérica ou betuminosa e formam películas com espessura superior a 3 mm (Santana, 2012).

A destacar os resultados provenientes do estudo elaborado por Almusallam *et al.* (2003), este analisou o desempenho de alguns revestimentos superficiais quanto à sua resistência contra ataque químico, penetração de cloretos e absorção de água. Através dos resultados obtidos, elaborou um quadro (Quadro 16) que se encontra organizado por ordem de eficácia para cada uma das situações.

Quadro 16 - Revestimentos superficiais recomendados tendo em conta as condições de serviço (Santana, 2012).

Condições de serviço	Revestimento recomendado por ordem decrescente de preferência
Ataque químico	Resinas epóxidas, poliuretanos, acrílicos
Presença de cloretos	Poliuretano, borrachas cloradas, Resinas epóxidas
Presença de água	Resinas epóxidas, borrachas cloradas, acrílicos

Os revestimentos superficiais apresentam uma vida útil média de 10 anos, dependendo sempre do tipo de protecção aplicada, as condições ambientais a que o revestimento estará exposto e da eficácia de aplicação do revestimento.

9.2.2 Impregnação hidrófuga

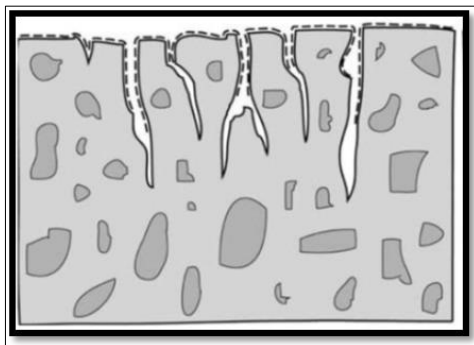


Figura 51 - Representação esquemática de uma impregnação hidrófuga (Santana, 2012).

Os impregnantes hidrófugos têm como objectivo repelir a água. Estes actuam de um modo diferente aos revestimentos superficiais. Penetram no sistema poroso sem que seja formado um filme na superfície do substrato, o que faz com que os poros e a capilaridade do betão sejam revestidos no seu interior (Figura 51) (Santana, 2012).

Os impregnantes mais usuais são compostos organossilícicos, que podem ser divididos em quatro categorias: os silanos, os siloxanos, os poliméricos e as resinas de silicone. Estes hidrófugos diferem apenas no tamanho das moléculas, na reactividade e na solubilidade em água, ou em solventes orgânicos (Santana, 2012).

Os compostos organossilícicos mais utilizados na protecção superficial do betão são os silanos e os siloxanos. As suas composições químicas fazem com que estes dois compostos sejam diferentes ao nível molecular, sendo que a sua utilização está condicionada pelas características do suporte. No caso em que o betão apresenta uma porosidade baixa, a escolha recai sobre os silanos, uma vez que estes são de menores dimensões e a impregnação será mais eficaz (Santana, 2012).

9.2.3 Impregnantes

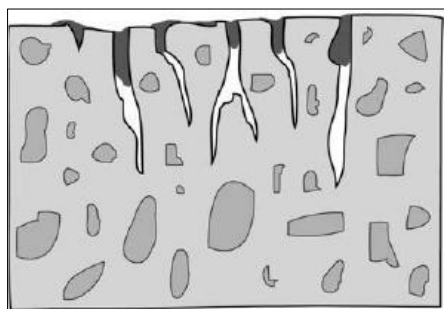


Figura 52 - Representação esquemática de um sistema de impregnação (Santana, 2012).

Os impregnantes usados na protecção superficial do betão têm como acção o preenchimento total ou parcial dos poros e capilaridades existentes no betão, reduzindo, deste modo, a porosidade (Figura 52).

Com o bloqueio promovido pelos impregnantes, a superfície do betão torna-se menos vulnerável à degradação através de agentes exteriores, o que faz com que a sua durabilidade seja maior. Os impregnantes não têm um comportamento hidrorrepelente, mas o preenchimento dos poros confere ao betão uma maior resistência física a agressões abrasivas e impactos casuais. Este tipo de produto é muitas vezes usado como endurecedor de superfícies em estruturas tais como pavimentos industriais, garagens ou estacionamento, devido às características acima indicadas.

Usualmente os impregnantes têm como base os silicatos de sódio, os fluoro silicatos, ou resinas sintéticas epoxídicas ou acrílicas (Santana, 2012).

9.2.4 Aplicação do sistema de protecção superficial no betão

A escolha do produto correcto para a protecção superficial do betão só por si não garante uma aplicação no betão e consequente protecção. Para além dos parâmetros ligados ao produto para a protecção, é preciso ter em consideração as condições em que a superfície do betão se encontra (Santana, 2012).

A fim de evitar anomalias ao longo da vida útil, é necessário ter algumas considerações em relação à superfície do betão e à sua preparação, de extrema importância para eficácia do produto de protecção superficial.

Santana (2012), apresenta alguns factores a ter em conta na preparação da superfície em que será aplicada o produto.

- **Limpeza da superfície** – As impurezas que se encontram na superfície do betão, tais como óleos, poeiras e materiais, deverão ser removidas para que não haja interferência com a impregnação ou com a formação de uma película superficial contínua.
Os detergentes emulsionantes, a lavagem com água a baixa pressão, a escovagem manual ou mecânica, o jacto abrasivo e o jacto a alta pressão são os processos mais comuns utilizados na limpeza da superfície do betão.
- **Decapagem** – A decapagem pode ser utilizada para a remoção de partes de betão que apresentam uma fraca aderência. Este tipo de processo faz com que haja uma rugosidade na superfície do betão que permite uma maior aderência do sistema de protecção superficial. Os métodos de decapagem mais comuns são através de

escovagens manuais ou mecânicas, jactos abrasivos ou de alta pressão e discos abrasivos.

- **Reparação e regularização da superfície** – A superfície do betão deve ser previamente regularizada e deve ser alvo de uma vistoria com a finalidade de detectar imperfeições na superfície do mesmo. Fissuras, crateras e locais com porosidade excessiva deverão ser alvo de reparação recorrendo a argamassas de cimento modificadas com polímeros, para que o resultado seja uma superfície plana e sem irregularidades.

O método de aplicação do sistema de protecção superficial deve ser sempre o indicado nas fichas técnicas fornecidas pelo fabricante do produto, para que este tenha o desempenho esperado.

9.2.5 Galvanização das armaduras

O processo de galvanização é feito através de uma imersão da armadura num banho de zinco fundido. Na superfície da armadura são formadas duas camadas: uma interna, com uma liga de zinco-ferro, e outra no exterior, composta de zinco puro.

Segundo Helene (1986), o zinco protege o aço de duas formas: como barreira entre o aço e o ambiente, e como ânodo de sacrifício.

Entre os autores consultados verifica-se um consenso que consiste em crer que a velocidade de corrosão no aço galvanizado em betões, sobre a influência de carbonatos, é muito inferior à do aço não galvanizado, como podemos verificar no Quadro 17.

Quadro 17 - Taxa média de corrosão em aço galvanizado (Polito, 2006).

Atmosfera	Penetração média (μ /Ano)
Industrial	6,3
Marinha	1,5
Rural	1,1
Árida	0,2

No caso de a armadura estar sobre ataque, devido à presença de cloretos, a armadura galvanizada possui um melhor comportamento em relação ao aço convencional.

Monteiro (2005) afirma que o cloreto necessita de ser 4 a 5 vezes maior para poder despassivar uma armadura com galvanização em relação ao aço sem revestimento.

A durabilidade de uma armadura galvanizada está pendente de dois factores: a espessura da camada de zinco aplicada e o pH da água existente no betão (Andrade,

1992). O mesmo autor recomenda que a espessura mínima de camada de zinco puro a aplicar deverá estar entre os 8 a 10 μm e, segundo Gonçalves (2003), não deverá passar dos 200 μm .

9.2.6 Resinas epóxi aplicadas na armadura

A protecção das armaduras por meio de resinas de epóxi consiste numa barreira física que as resinas proporcionam após a sua aplicação na superfície da armadura. Gentil (2003), afirma que a resina epóxi é uma das protecções de armaduras mais eficazes no combate à corrosão nas armaduras, pois a resina possui boas propriedades de aderência, de resistência química e de alta resistência à abrasão e ao impacto. Porém, a sua grande limitação consiste na película de epóxi sobre danos, o que pode fazer com que se dê o aparecimento de macromoléculas de corrosão. Gonçalves (2003) acrescenta que, em armaduras revestidas com resina de epóxi, não é possível aplicar tratamentos através de dispositivos electroquímicos, o que dificulta uma possível reabilitação de uma armadura que esteja a sofrer de corrosão.

A Figura 53 mostra-nos a corrosão devido ao rompimento da película de resina na armadura.



Figura 53 - Corrosão devido a ruptura da película de resina numa armadura (Polito, 2006).



Figura 54 - Armaduras com película de base epóxi (Polito, 2006).

Em termos de espessura a aplicar nas armaduras, Gonçalves (2003) defende que a espessura de resina deve estar entre 180 μm a 300 μm de maneira a garantir uma protecção eficaz.

Andrade (1992), relata que pode denotar-se um problema de aderência entre a armadura com epóxi e o betão. Gonçalves (2003), complementa que espessuras inferiores a 250 μm não afectam a aderência entre o betão e o aço. Valores superiores podem levar a um decréscimo de 60% de aderência entre o betão e o aço.

O Quadro 18 faz uma comparação sintetizada entre os diferentes tipos de revestimento que podem ser aplicados nas armaduras:

Quadro 18 - Comparação entre revestimentos aplicáveis a armaduras (Polito, 2006).

Tipo	Galvanização	Resina Epóxi
Influência no aço	Nenhuma	Nenhuma
Temperaturas externas	Suporta 200-300°C	Tolera 200°C, apesar do 100°C pode ocorrer problemas de aderência do betão /aço
Aderência ao betão	Desenvolvimento mais tardio nos tempos iniciais, porém no final acaba sendo igual à do aço não revestido	Redução em média de 15 % em relação ao aço não revestido. Podem causar perdas de aderência em cargas inferiores
Betão carbonatado	Benéfico	Não existe referência de grandes problemas na sua aplicação
Betão contaminado com cloreto	Cloreto adicionado ao betão: redução do tempo de serviço devido à formação de pites. Cloreto do exterior: superiores a 1% em relação ao cimento podem ser prejudiciais se o betão sofre períodos cíclicos de humecimento	Resistem bem aos iões cloreto (se não se encontrarem excessivamente danificados)
Betão fissurado	Velocidade de corrosão acelerada em fissuras superiores a 0,3 mm (dependendo da espessura de recobrimento)	Redução do perigo de corrosão (se não se encontrar danificado)

9.3 Armaduras especiais

O recurso a armaduras com especiais componentes metálicos, tais como aço inoxidável em vez da opção comum do aço normal, pode consistir numa hipótese viável, sendo que esta é uma alternativa que trabalha directamente com a armadura e não com a ligação betão/armadura.

Com o aparecimento de novos materiais que podem ser inseridos nas armaduras e no fabrico do aço, tais como o aço inoxidável ou fibras plásticas, é possível ter material com corrosão, com uma taxa de iniciação de corrosão muito longa e taxas de corrosão desprezáveis. Facilmente, a vida útil de uma estrutura pode atingir entre 100 a 120 anos.

9.3.1 Aço Inoxidável

O aço inoxidável contém 10,5 % de cromo e uma percentagem máxima de 1,2 de carbono, que lhe confere uma alta resistência à corrosão atmosférica.

Para Gentil (2003), o aço inoxidável, quando é confrontado com a presença do oxigénio, forma uma película de óxido de cromo (Cr_2O_3), que possui uma boa aderência, continuidade, alta resistividade eléctrica e uma ausência de porosidade. Todas estas características conferem a essa película uma boa resistência contra meios corrosivos.

Os aços inoxidáveis podem ser classificados como: austeníticos, ferríticos, martensíticos e duplex, mas apenas os austeníticos e o duplex são apropriados para serem usados como armaduras de betão armado, segundo Tula (2005). Porém, Gonçalves (2005)

defende que geralmente são utilizadas as armaduras em aço inoxidável dos tipos austenítico, ferrítico e austenítico-ferrítico, e os ferríticos devido ao seu custo, são utilizados em ambientes pouco agressivos.

A corrosão comum nos aços inoxidáveis é localizada por pites. Gonçalves (2003), afirma que os aços inoxidáveis são extremamente sensíveis a um ataque por parte dos cloretos, apresentando um conteúdo crítico de cloretos na ordem de 2 a 8 vezes maior à do aço comum.



Figura 55 - Armaduras com aço Inox (Duggato, 2006).

9.3.2 Varões FRP

Os varões FRP usados na construção civil apresentam características de um material anisotrópico. Estes são constituídos por fibras contínuas que se encontram impregnadas com resinas especiais. O seu processo de produção pode ser feito através de extrusão, entrançamento (*braiding*) ou através da tecelagem (*weaving*).

A matriz polimétrica é o elemento que mantém as fibras unidas e confere uma protecção das mesmas contra ambientes agressivos. Esta é química e deve ser termicamente compatível com as fibras utilizadas (Reis, 2009).

As fibras mais frequentemente recorridas para o fabrico de varões de FRP são as de vidro (G), de aramida (A), de carbono (C) e, mais recentemente, as fibras de basalto (B).

A exposição a determinados ambientes, onde haja água, exposição ultra violeta, elevada temperatura, soluções alcalinas ou ácidas, pode resultar em alterações na resistência e rigidez dos varões de FPR. A prevenção da deterioração das fibras é feita através da matriz, sendo que esta fornece uma barreira contra ataques provenientes dos ambientes agressivos, porém existem factores tais como a natureza do ambiente, temperatura, condição de aplicação e aplicação do compósito, que podem influenciar a protecção fornecida pela matriz (Reis, 2009).

Os efeitos nocivos provenientes da presença de cloretos e carbonatação são:

- **Efeito dos cloretos**

Os varões de CFRP no betão demonstram pouca degradação quando expostos a um ataque combinado dos cloretos e humidade. Relativamente aos varões de GFRP e AFRP, estes podem sofrer perdas até 50% da sua resistência e rigidez, exibindo relaxação na ordem dos 30% (Reis, 2009).

- **Carbonatação**

É pouco provável que a carbonatação afecte os varões de FRP, podendo mesmo aumentar a sua vida de serviço e a sua durabilidade, uma vez que leva à redução do pH, ou seja, do meio alcalino, prejudicial a algumas fibras e polímeros (Reis, 2009).

9.4 Inibidores de corrosão

Os inibidores de corrosão podem ser considerados como substâncias ou uma mistura de substâncias que, quando introduzidas num meio corrosivo, podem levar à redução ou eliminação da corrosão (Gentil, 2007).

O mesmo autor relata que, para que o recurso a inibidores de corrosão seja satisfatório, é preciso considerar quatro aspectos: a causa da corrosão, custo de utilização, propriedades e mecanismos de acção dos inibidores a serem usados, e condições adequadas de adição e controle (Gentil, 2007).

- **Causa da corrosão**, no sistema tem como finalidade a identificação dos problemas relacionados com a corrosão que podem ser alvo de tratamento através do uso de inibidores de corrosão (Gentil, 2007);
- **Custos de utilização**, a análise do custo que pode originar a aplicação de inibidores deve ser efectuada no sentido de tentar prever se a sua utilização excede ou não as perdas originadas pelo processo corrosivo (Gentil, 2007).

Na análise efectuada devem ser tomados em conta os seguintes factores:

- ✓ Aumento da vida útil da estrutura;
- ✓ Se haverá mudanças a nível arquitectónico;
- ✓ Aspecto decorativo da estrutura;
- ✓ A ausência de contaminação de produtos.
- **Propriedades e os mecanismos de acção dos inibidores a serem usados**, é necessário verificar se existe compatibilidade com o processo em operação e com

os materiais metálicos usados. Esta verificação é feita para que sejam evitados efeitos secundários prejudiciais tais como:

- ✓ Redução de acção de catalisadores, devido à possibilidade de os inibidores serem absorvidos pelos catalisadores;
- ✓ Queda de eficiência térmica;
- ✓ Possibilidade do inibidor proteger o material metálico e ser corrosivo para o betão.
- **Condições adequadas de adição e controle**, têm como fim evitar possíveis inconvenientes tais como:
 - ✓ Acréscimo de espessuras devido a depósitos de fosfatos, silicatos, ou carbonatos de cálcio que podem dificultar trocas térmicas;
 - ✓ Perda de inibidores devido à deficiente solubilidade no meio corrosivo;
 - ✓ Reacções entre os inibidores e possíveis contaminantes do meio corrosivo.

9.4.1 Classificação dos inibidores de corrosão

Os inibidores de corrosão podem assumir diferentes classificações que podem ter como base a sua composição e o seu comportamento. Quanto à composição, temos inibidores de base orgânica e inorgânica e, quanto ao comportamento, podem assumir a classificação de oxidantes, não oxidantes, catódicos, anódicos e de absorção (Gentil, 2007).

Inibidores anódicos

Os inibidores anódicos actuam reduzindo as reacções anódicas. Estes impedem ou retardam a reacção do ânodo, que reage com o produto proveniente da corrosão. Essa reacção provoca um filme aderente e insolúvel na superfície das armaduras onde ocorre a polarização anódica (Gentil, 2007).

Este tipo de inibidor reage com o produto proveniente da corrosão instalado nas armaduras, originando uma película aderente e extremamente insolúvel na superfície do aço, fazendo assim com que haja protecção à armadura como podemos verificar na Figura 56 (Dugatto, 2006).

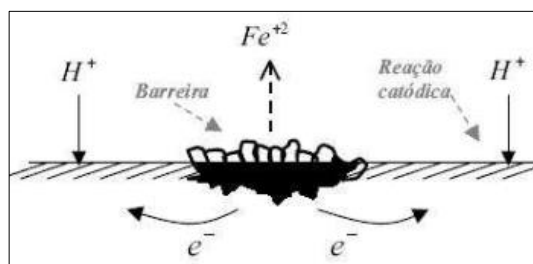


Figura 56 - Processo de inibição na superfície anódica (Dugatto, 2006).

Os inibidores anódicos podem ser hidróxidos, carbonatos, silicatos, boratos e fosfatos terciários de metais alcalinos. Estes reagem com os iões metálicos produzidos no ânodo, dando origem à formação de produtos insolúveis.

A utilização dos inibidores anódicos tem a sua actuação condicionada pela dosagem, ou seja, para que haja um aproveitamento máximo das suas características é necessário que seja aplicada uma quantidade adequada para o efeito pretendido. Cada inibidor tem uma concentração crítica na solução. Se for aplicado um valor inferior ao crítico, o produto insolúvel e protector pode não se formar em toda a extensão das armaduras, fazendo com que hajam pontos vulneráveis na armadura à corrosão. De tal modo, deve haver um cuidado em manter a concentração do inibidor acima do valor crítico.

Inibidores catódicos

Os inibidores catódicos funcionam reprimindo reacções catódicas. Estes fornecem iões metálicos que reagem com a alcalinidade catódica, que levam à produção de compostos insolúveis.

Os compostos insolúveis envolvem a área catódica impedindo a difusão do oxigénio e a condução de electrões, deste modo inibindo o processo catódico. Essa inibição faz com que haja uma acentuada polarização catódica (Figura 57).

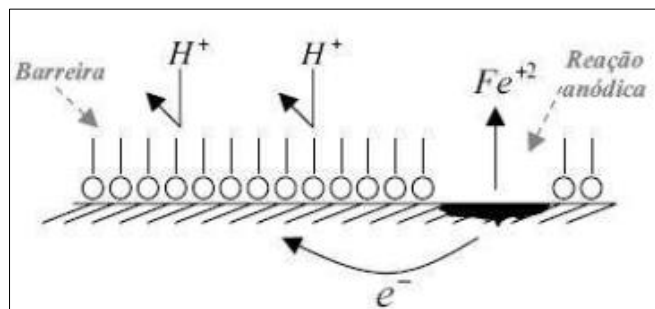


Figura 57 - Processo de inibição na superfície catódica (Dugatto, 2006).

Sulfatos de zinco, de magnésio e de níquel são regularmente usados como inibidores catódicos. Estes inibidores catódicos fazem com que haja uma polarização catódica, o que leva a que o metal existente no cátodo não entre em solução, mesmo que este não se encontre totalmente coberto. Consequentemente, não haverá corrosão localizada, o que leva a afirmar que os inibidores catódicos são mais seguros. Porém, é possível fazer combinação entre inibidores catódicos e anódicos.

Dugatto (2006) relata que os inibidores catódicos aplicados no betão têm uma eficácia menor quando comparada com a dos inibidores anódicos. Tal deve-se ao facto dos inibidores catódicos não aderirem à superfície das armaduras como os anódicos.

Inibidores de absorção

Os inibidores de absorção funcionam como películas protectoras, tendo a capacidade de formar películas sobre as áreas anódicas e catódicas através de acção electroquímica. Este tipo de inibidores inclui substâncias orgânicas que permitem a formação de películas por absorção.

Inibidores oxidantes e não oxidantes

Este tipo de inibidores pode ser classificado de acordo com a necessidade da presença do oxigénio dissolvido para que se possam desencadear as reacções necessárias para a criação da película de protecção nas armaduras. Como tal, podemos afirmar que os inibidores oxidantes não precisam de oxigénio dissolvido para que haja uma criação de película protectora nas armaduras. Quanto aos inibidores não-oxidantes, o processo é inverso, pois estes necessitam da presença de oxigénio dissolvido para a criação da película protectora e consequente passivação das armaduras. O Quadro 19 faz a comparação entre os dois tipos de inibidores orgânicos e inorgânicos (Polito, 2006).

Quadro 19 - Acção de alguns inibidores de corrosão no betão (Polito, 2006).

Características	Inibidores inorgânicos		Inibidores orgânicos
	Nitritos	MPF (monofluorofosfato)	Voláteis
Resistência a compressão	Aumenta	Diminui	Não significativo
Porosidade no betão	Pouco significativo	Reduz por precipitação de fosfato de cálcio	Sem estudos
Compatibilidade química com o betão	Boa	Reage em meio alcalino formando fosfato de cálcio que precipita	Boa
Concentração crítica junto a armadura	$[NO_2/Cl] = 1,5$ (razão molar)	$[MPF/Cl] = 1, 0$	Não se conhece e existem dificuldades de medição
Mecanismo de acção inibidora	Inibidor anódico reconstitui a película passivadora	Inibidor de absorção: efeito barreira	Não tem uma definição concreta depende dos constituintes
Comportamento a longo prazo	Existem alguns resultados em betão fissurado, existem algumas controvérsias, pode ocorrer problemas devido ao consumo do inibidor	Sem resultados conhecidos	Sem resultados conhecidos
Compatibilidade ambiental	Problemas de toxicidade nas situações de ocorrência de lixiviação e na demolição da estrutura criam resíduos perigosos	Sem inconvenientes conhecidos	As aminas são produtos irritantes
Método de aplicação	No betão fresco ou endurecido por projecção ou injeção	No betão endurecido por impregnação	No betão fresco e endurecido por impregnação

10 Caso de estudo

10.1 Introdução

O seguinte caso prático baseia-se num estudo do estado de estabilidade de muros existentes no conjunto Habitacional da Palmeira, em Câmara de Lobos. Este estudo foi solicitado ao Laboratório Regional de Engenharia Civil (LREC) por parte de Investimentos Habitacionais da Madeira (IHM).

Sendo que o tema de dissertação consiste no estudo da corrosão induzida pela carbonatação e por cloretos, pretende-se, com este caso de estudo, dar a conhecer as normas envolvidas nos ensaios laboratoriais praticados por parte do Laboratório Regional de Engenharia Civil, de modo a quantificar o estado de corrosão pelos efeitos acima indicados.

Outro objectivo deste caso de estudo consiste na descrição dos procedimentos laboratoriais realizados e, numa fase final deste caso prático, serão apresentadas soluções de reabilitação e protecção dos muros em questão. Esta proposta de reabilitação e protecção apenas aborda a problemática de corrosão por efeito de carbonatação e presença de cloretos e será apenas de carácter académico, atendendo ao aspecto de recuperação das estruturas de contenção, sem ter em conta o aspecto económico envolvido na reabilitação.

10.2 Caracterização histórica e geográfica do Conjunto Habitacional da Palmeira

O Conjunto Habitacional da Palmeira também conhecido como bairro da Torre, é um bairro de construção económica. Situa-se no lugar da Palmeira, sítio da Torre, na freguesia de Câmara de Lobos, e tem como destinatários famílias de baixos recursos financeiros.

O Conjunto Habitacional da Palmeira foi inaugurado no dia 25 de Julho de 1982, deste modo, trata-se de uma estrutura com cerca de 30 anos. Possui uma área de 23.341 m² e, na fase inicial possuía, 240 fogos, 12 de tipo T3 e 120 de tipo T4. A sua construção teria um valor estimado em 3.042,67 €.

Com o passar do tempo, o empreendimento teve um acréscimo de fogos. Numa fase inicial, foram adicionados mais 14 fogos, em 1983. De seguida, em 1993, foram adicionados mais 19 fogos.

Em 2011, teve lugar a apresentação pública da 2.^a fase de recuperação urbanística deste bairro, sendo que esta representa a última fase da intervenção que, desde 2004, vinha inserir melhoramentos significativos neste conjunto habitacional, com a construção e a recuperação integral de 98 novos fogos. Na 2.^a fase da intervenção de recuperação urbanística, está prevista uma intervenção em 31 dos Blocos habitacionais que apresentam um elevado estado de degradação. Na Figura 58 podemos visionar o empreendimento em causa.

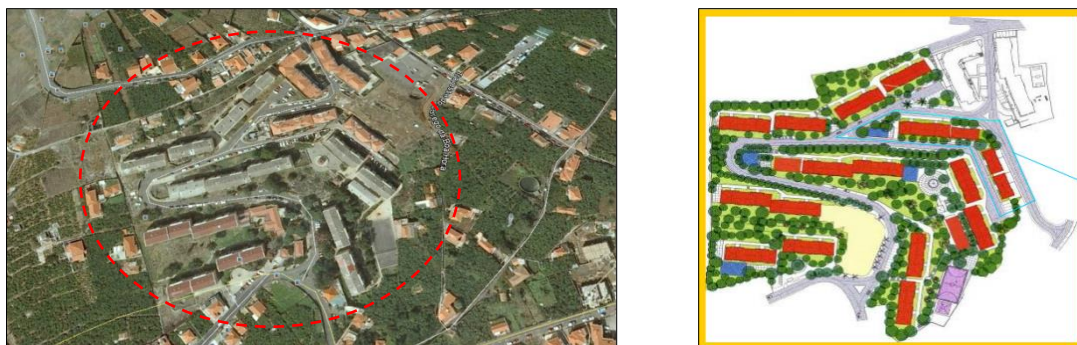


Figura 58 - Fotografia aérea e projecto arquitectónico do Conjunto Habitacional da Palmeira (IHM, 2013).

10.3 Metodologia utilizada

A metodologia utilizada pelo LREC visa uma caracterização de todas as causas que levaram à degradação e ruína de alguns muros, porém, para o caso de estudo desta dissertação serão apenas discutidas as causas de degradação dos muros de suporte tendo em vista a corrosão por carbonatação e presença de cloreto, como tal, os pontos 5 e 6 não serão abordados neste caso prático.

Deste modo a metodologia utilizada foi a seguinte:

Quadro 20 - Metodologia utilizada para a identificação das causas de degradação dos muros de suporte.

Nº	Processo
1	<i>Levantamento das principais patologias;</i>
2	Compreensão das causas da ruína do muro
3	Levantamento geométrico dos muros
4	Recolha de carotes de betão dos restantes muros, de modo a caracterizar a resistência à compressão do betão, aplicado em obra e profundidade de carbonatação e presença de cloretos e seu teor de concentração;
5	Cálculo dos esforços resistentes dos muros;
6	Cálculo dos esforços actuantes e respectivos coeficientes de segurança em função da altura do muro;
7	<i>Cenário de soluções possíveis para a recuperação estrutural dos muros.</i>

10.3.1 Levantamento das patologias encontradas

O levantamento das principais patologias envolveu vistoria e catalogação das diversas patologias encontradas num conjunto de muros que tem um comprimento de 567m e variam em alturas entre 0,7m ("M16") a 7,5 m ("M11") (Figura 59).



Figura 59 - Muros de suporte: a) Muro "M16"; e b) Muro "M11".

Como verifica-se na Figura 60, existem patologias de desaprumo, sendo que os muros "M9", "M15" e "M17", apresentam os maiores valores, que são respectivamente de 12cm, 31,5cm e 13cm que, quando comparados com as alturas obtemos inclinações de 3,5%, 6,3% e 3,8%, respectivamente.

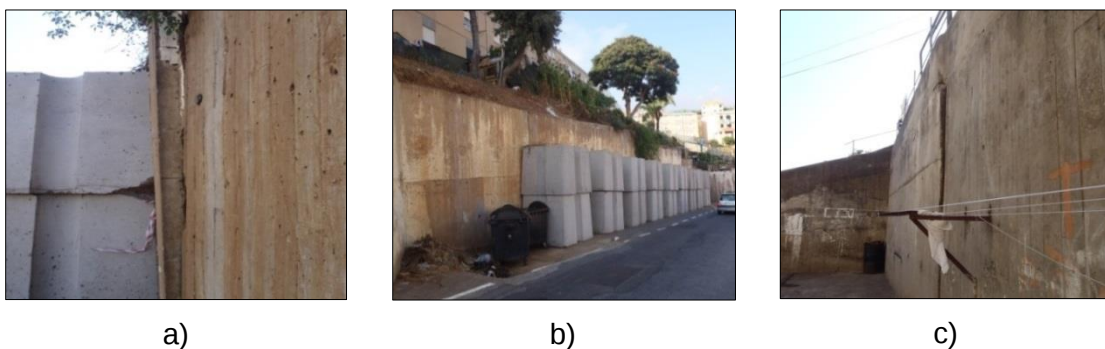


Figura 60 - Desaprumos: Muros a)"M9"; b)"M15"; c)"M24".

Outra patologia encontrada, que se enquadra no âmbito deste tema de dissertação, foi a exposição das armaduras ao meio ambiente, originando a oxidação das mesmas.

Tal facto deve-se à pouca espessura do recobrimento, o que permitiu a corrosão, originando uma perda de secção nos varões.

A Figura 61 exemplifica a patologia acima descrita.

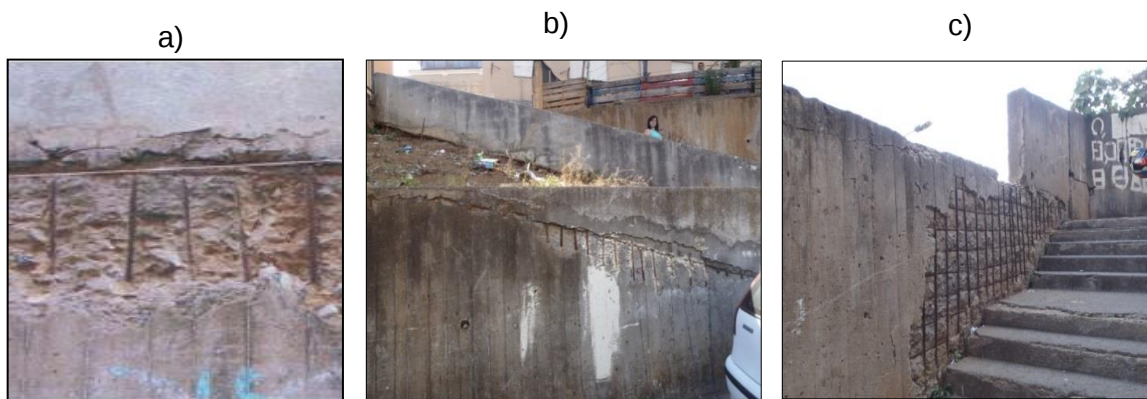


Figura 61 - Locais onde a armadura ficou exposta devido a falta de recobrimento a) "M22"; b) "M7"; c) "M10".

Quanto ao coroamento dos muros é possível constatar que as armaduras encontram-se sobre oxidação, o que causou um destacamento da camada de betão do topo dos muros como é possível verificar na Figura 62.



Figura 62 - Destacamento da camada do coroamento do muro "M 14a".

É possível registar, igualmente, outra patologia em relação às condições de drenagem, pelo facto de existir um número elevado de furos de drenagem obstruídos, fazendo com que estes não cumpram a sua função de drenagem (Figura 63).

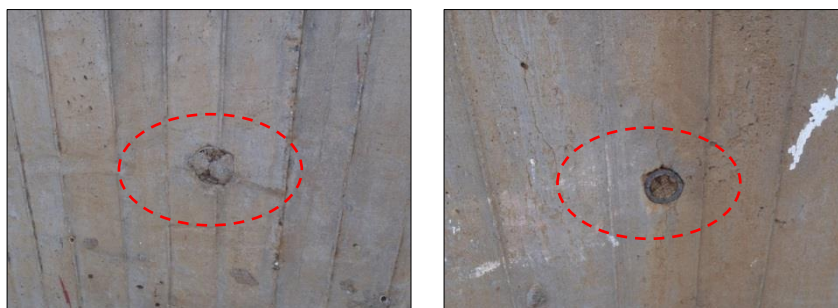


Figura 63 - Furos de drenagem obstruídos.

10.3.2 Compreensão das causas da ruína do muro

Através da observação feita pode constatar-se que a rotura aconteceu na secção junto à base, foi possível também verificar que a ruína do muro está ligada à abertura de fendas no betão no tardo do muro junto à base. A abertura de fendas permitiu o acesso de agentes nocivos que, por sua vez, desencadearam o processo corrosivo das armaduras principais. Estando as armaduras sob corrosão, deu-se uma perda de secção que conduziu à plastificação e posteriormente à rotura.

Foi possível observar no local que, o muro não possui camada drenante a tardo e, sendo que a maioria dos furos drenantes se encontra bloqueada, faz com que haja um aumento de esforços devido ao impulso hidrostático resultante da acumulação de água no tardo dos muros.



Figura 64 - Muro que ruiu.

Segundo as informações recolhidas no local verificou-se que a armadura principal dos muros de suporte de betão armado apresenta varões de diâmetro de 12 mm, afastados de 15 cm. Para uma caracterização dos materiais foram retiradas três carotes às quais se efectuou seis provetes, provenientes dos destroços do muro. Uma vez que o muro se apresentava num estado de ruína, não é possível identificar a que zona correspondem as carotes recolhidas.

Quadro 21 - Resultados do ensaio à compressão das carotes de betão correspondentes ao muro que ruiu.

Muro	Carote N.º	Provete N.º	Dimensões		Resistência à compressão (MPa)	
			Diâmetro	Altura	Por provete	Média
"M13"	13-1	13.1-A	99	101	21,0	20,8
		13.1-B	99	101	20,5	
	13-2	13.2-A	99	103	30,0	36,5
		13.2-B	99	103	43,0	
	13-3	13.3-A	99	102	32,5	30,3
		13.3-B	99	100	28,0	

Como podemos verificar no Quadro 21 existe uma grande variedade de resultados que variam entre os 20,5 MPa e 43,0 MPa. Em anexo, na página 124, encontra-se o boletim com os resultados referentes a este ensaio.

À semelhança da recolha das carotes de betão, foram recolhidos como amostras dois varões provenientes da armadura principal, de modo a que estes pudessem ser sujeitos a uma avaliação à tracção. Para tal, das duas recolhas, prepararam-se três provetes para o ensaio à tracção. Os resultados obtidos podem ser observados no Quadro 22.

Quadro 22 - Resultado do ensaio á tracção dos varões de aço.

Muro	Varão N.º	Proвете N.º	Diâmetro (mm)	Área (m ²)	Tensão de rotura à tracção (MPa)
"M13"	1	070/13-37.1	10,32	83,65	757
		070/13-37.1	10,50	86,59	731
	2	070/13-39.1	10,30	83,32	786

Como se pode averiguar no Quadro 22, existe uma redução significativa na ordem dos 20 % no diâmetro dos varões, pois estes inicialmente seriam de 12 mm. Tal poderá ser atribuído à corrosão instalada nos mesmos. Em anexo, nas páginas 121, 122, 123, encontram-se os boletins com os resultados deste ensaio.

10.3.3 Levantamento geométrico dos muros

De seguida procedeu-se a uma avaliação da estabilidade dos restantes muros de suportes no Complexo Habitacional da Palmeira. Para tal foi efectuado registo das características geométricas dos muros.

Através de uma inspecção visual verificou-se que o betão existente nos muros possuía várias características de aspecto negativo, tais como:

- Fissuração acentuada na camada superficial de recobrimento no coroamento dos muros.
- Destacamento de betão.
- Oxidação em várias áreas das armaduras.

As propriedades geométricas retiradas foram altura, comprimento, desaprumos dos muros e, por fim, foram calculadas as inclinações dos muros. Os dados retirados estão documentados em anexo no Quadro 24 na página 111.

De salientar que os muros evidenciam aumentos de alturas iniciais, como se pode observar na Figura 65.



Figura 65 - Aumento das alturas iniciais dos muros ("M8", "M22").

10.3.4 Recolha de carotes e respectivos ensaios de carbonatação e teor de cloretos.

Para que fosse possível uma caracterização detalhada do betão existente nos muros de suporte, foi executada uma prospecção de onde foram recolhidas 30 carotes dos muros. As carotes extraídas distam da base do pavimento um metro. A planta de identificação dos muros e das carotes recolhidas encontra-se em anexo na página 162 e 162.

De seguida procedeu-se ao ensaio laboratorial para a determinação da profundidade de carbonatação e do teor de cloretos.

Descrição do processo laboratorial utilizado para a determinação da profundidade de carbonatação e o teor de cloretos e resultados dos mesmos

As Normas utilizadas para a determinação da carbonatação e cloretos presentes no betão armado no caso prático foram EN 14629 - 2007 “Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test Methods – Determination of Chloride Content in Hardened Concrete”, EN 14630 – 2006 “Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method” e LNEC E 391:1975 “Determinação da resistência à carbonatação”.

Amostra

O processo de recolha de amostras fez-se com auxílio de uma máquina de perfuração, onde foi acoplado um dispositivo para extracção de carotes. No total foram recolhidas 30 carotes.

Após a recolha das mesmas foi aplicada uma limpeza por via húmida a fim de limpar a superfície da carote de impurezas provenientes do método de recolha da carote e de outras que possam estar presentes, de modo a que a superfície da carote se apresentasse limpa.

A Figura 66 demonstra o processo de recolha de carotes. As carotes que podem ser visualizadas na figura são referentes ao muro que ruiu.

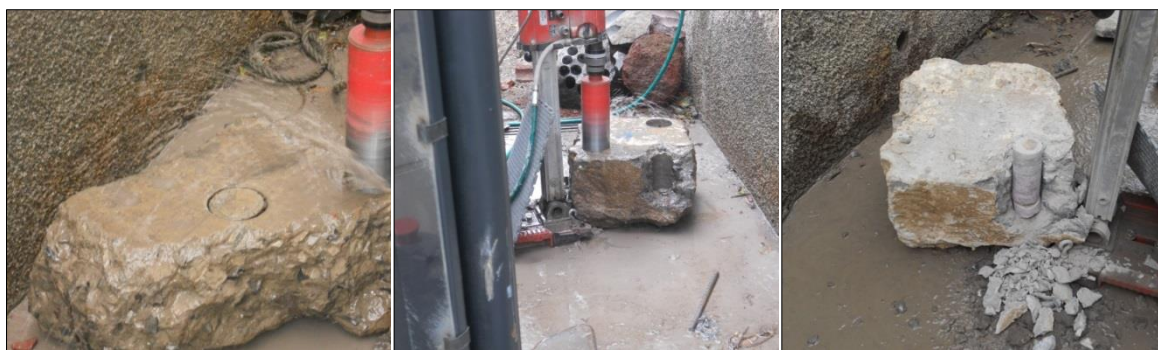


Figura 66 - Recolha de carotes do muro "M13" que ruiu.

De seguida procedeu-se ao ensaio para determinar a presença e a profundidade de carbonatação através de um indicador de pH (fenolftaleína).

Aplicação do indicador de fenolftaleína

Uma solução de indicador de fenolftaleína é normalmente composta por 1g fenolftaleína dissolvido em 70 ml de álcool etílico e diluído a 100 ml com água destilada ou desionizada.

Como mencionado anteriormente, a execução deste exame laboratorial é de extrema rapidez e facilidade, e consiste em borrifar a superfície da carote com o indicador de pH que, neste caso, foi a fenolftaleína como estipulado pela norma.

Após a aplicação do indicador de pH, a superfície apresentou duas zonas, sendo uma em tons de rosado, que representa a zona não afectada por carbonatada e a segunda zona apresenta-se incolor, sendo que esta representa a área que está sob acção de carbonatação.

Medição da profundidade de carbonatação

Identificadas as zonas de carbonatação e não carbonatação, procedeu-se à medição da profundidade de carbonatação com recurso a uma régua com escala menor de milímetros.

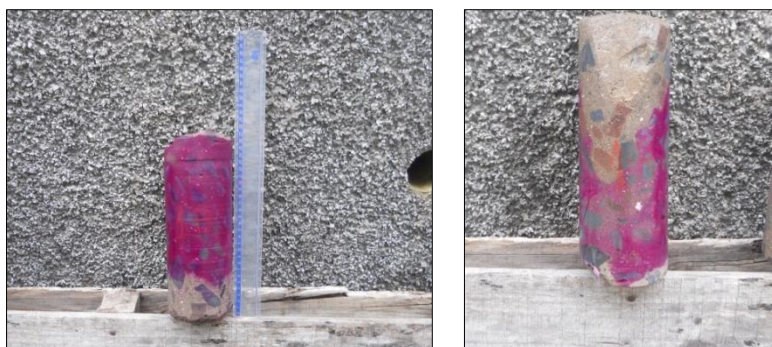


Figura 67 - Ensaio de presença de carbonatação com recurso a indicador de pH fenolftaleína.

Determinada a profundidade de carbonatação, procedeu-se ao corte de várias secções da carote carbonatadas e não carbonatadas para que fosse efectuado o ensaio à compressão axial ao betão.

Resultados do ensaio de determinação de profundidade de carbonatação

A Figura 68 faz a relação entre o número de carote e a profundidade de carbonatação. Como é possível verificar registaram-se valores elevados de profundidade de carbonatação sendo que na carote nº 22 registou-se uma profundidade máxima na face exterior de 107mm e a profundidade mínima registrada foi de 30 mm na carote nº 4 e 8.

Quanto a face interior a carote nº 22 voltou a registar o valor máximo de 45 mm (em anexo, nas páginas 130 a 159, encontram-se os boletins de ensaio referentes à carbonatação).

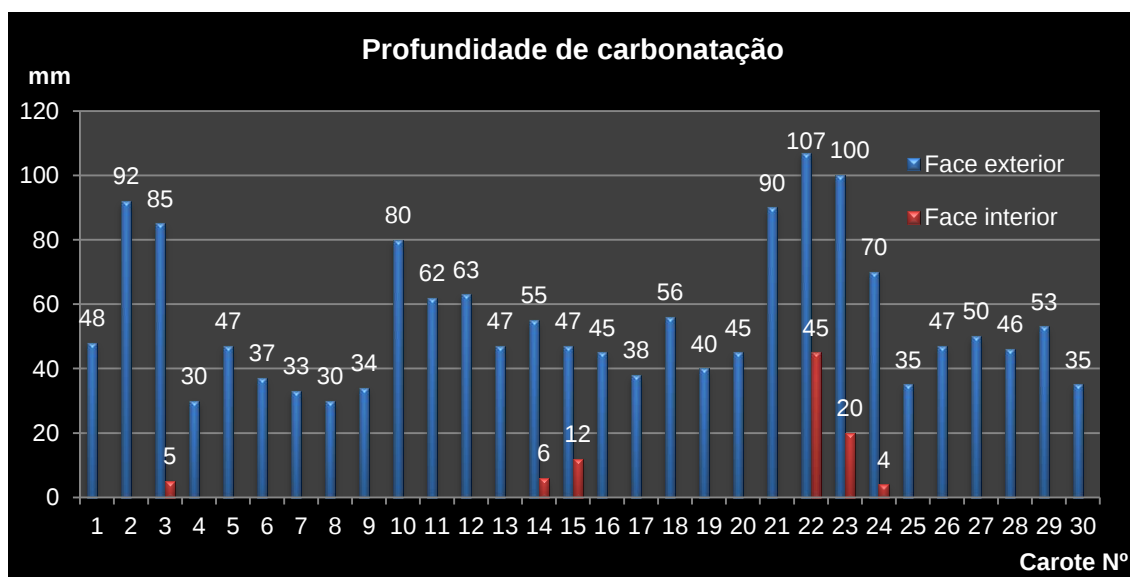


Figura 68 - Resultados do ensaio de medição de frente de carbonatação.

Posteriormente, nos casos possíveis, foi submetido o ensaio à compressão de provetes de parte da parte carbonatada, estando os resultados expostos, no Quadro 23.

Quadro 23 - Resultado do ensaio à compressão das carotes do betão carbonatado.

Muro	Carote Nº	Provete Nº	Dimensões (mm)		Resistência à compressão (MPa)
			Diâmetro	Altura	
M 12b	3	3.3	69	72	12.0
M 17	22	22.3	99	101	6.0
	23	22.3	69	69	5.0

De seguida procedeu-se a preparação dos provetes para o ensaio aos cloretos.

Secagem

Após o ensaio à presença e profundidade de carbonatação, seguiu-se o processo de secagem onde a carote é inserida na estufa (Figura 69) a uma temperatura de 105°C, podendo haver uma oscilação de 5°C na temperatura. Quando a amostra apresenta-se seca (a massa entre secagens sucessivas não varia mais de 0,1%) é retirada da estufa de modo a que possa arrefecer até à temperatura ambiente.



Figura 69 - Estufa utilizada no processo de secagem das carotes.

Moagem

O próximo passo consiste na moagem das carotes. A moagem consiste em transformar a carote retirada em pó e, para tal, recorreu-se ao auxílio de um moinho mecânico. Neste caso foi utilizado o moinho de bolas planetário PM100.

O método de utilização deste tipo de moinho consiste na introdução de esferas metálicas juntamente com as carotes no moinho. De seguida, é regulada uma velocidade de rotação, fazendo com que a colisão entre as carotes e as esferas leve à transformação da carote num pó de elevada finura.



Figura 70 - Moinho utilizado na transformação de carotes em pó.

Após a moagem procedeu-se à peneiração do pó, através de um peneiro de dimensão <1,18 mm. De seguida, procedeu-se à homogeneização da amostra.

Pesagem tomas analíticas

Esta fase caracteriza-se pela recolha de duas amostras de 5 gramas em pó de cada carote. Nesta fase de pesagem de amostras foi utilizada por uma balança de precisão, como podemos constatar na Figura 71.

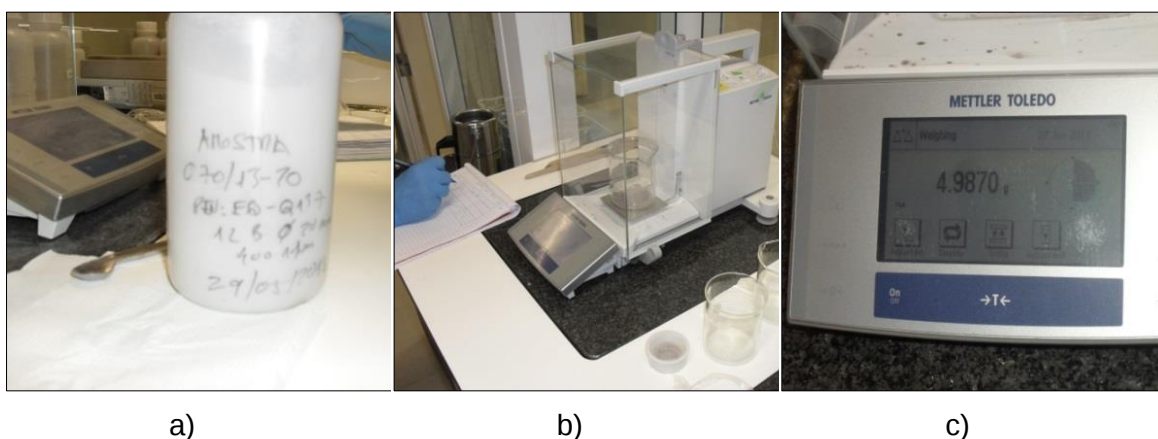


Figura 71 - Processo de toma analítica: a) amostra; b) balança; c) medição de 5 g proveniente da amostra.

Por fim, de salientar que em cada 20 amostras recolhidas, é tirada uma amostra extra que é denominada "padrão de controlo". Esta serve como uma amostra de referência.

Dissolução

A fase de dissolução consistiu na transferência da amostra para um copo de 500 ml. Foram adicionados 50ml de água com uma proveta de 50 ml e 10 ml de ácido nítrico HNO_3 , através de uma pipeta de 10 ml. De seguida, adicionou-se 50 ml de água quente. De seguida foi colocado numa placa de aquecimento, levando a solução até à ebulição, como é possível verificar na Figura 73, realizando, conjuntamente, uma

agitação proporcionada através de uma placa de magnética inserida no copo de 250 ml (Figura 72). O estado de ebulição foi mantido durante 3 minutos (Figura 73).



Figura 72 - Introdução da placa magnética para agitação da solução.

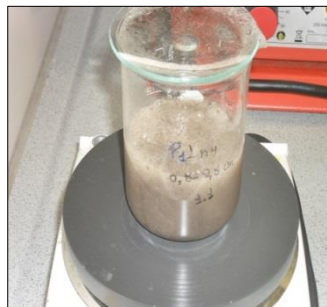


Figura 73 - Ebulição da solução durante 3 min.

Atingida a ebulição, fez-se uma filtração, onde a amostra foi filtrada através de papel de filtro médio, num filtro que é acoplado a um kitazato de 500 ml. O resíduo depositado no funil é lavado exaustivamente com água quente. A Figura 74 Exemplifica o procedimento acima referido. A filtração é feita através de vácuo, acoplado ao kitazato, sendo que, no fim, obteve-se uma solução incolor (Figura 75).



Figura 74 - Filtragem auxiliada com água quente.



Figura 75 - Material filtrado.

Titulação

A titulação pode ser feita através do método de Volhard ou através de Potenciometria. Sendo este um trabalho de foro académico, foi feita a titulação das duas formas acima referidas. É importante salientar que as etapas acima mencionadas são idênticas nos dois métodos, porém o método potenciométrica apresenta-se como um método mais célere e mais exacto, não dependendo de nenhum tipo de coloração.

Titulação método de Volhard (A)

Foram adicionados 10 ml de nitrato de prata (Figura 76) com uma concentração conhecida de $0,02 \text{ mol.dm}^{-3}$, através de uma pipeta, sendo que a solução é agitada

constantemente. De seguida são adicionados 2 ml de 3,5,5-trimetilhexanol (agente floculante).

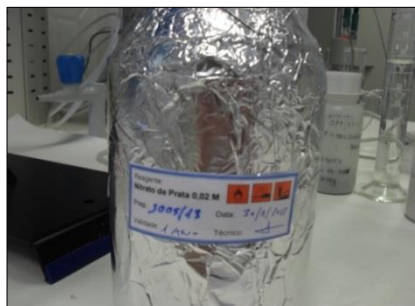


Figura 76 - Nitrato de prata.

Posteriormente foram adicionadas 5 gotas de indicador (sulfato de amónio de ferro), e introduzido tiocianato de amónio registando o volume introduzido até à mudança de cor da solução para salmão como podemos verificar na Figura 77.



Figura 77 - a) solução inicial; b) solução final após titulação.

A norma EN 14629 relata que, sabendo o volume de nitrato adicionado à solução, é possível calcular a percentagem de cloretos por massa de betão através da seguinte formulação:

$$Cl(\%) = 3.545 \times \frac{C_{\text{nitrato de prata}} \times (V_{\text{tiocianato de amónio}}^{\text{Betão}} - V_{\text{tiocianato de amónio}}^{\text{Branca}})}{m_{\text{betão}}} \quad \text{eq (10.1)}$$

Em que:

Cl (%) - teor de cloretos por massa de betão em percentagem.

$C_{\text{nitrato de prata}}$ – concentração da solução padronizada de nitrato de prata.

$V_{\text{tiocianato de amónio}}^{\text{Betão}}$ – volume de nitrato de prata adicionado à amostra.

$V_{\text{tiocianato de amónio}}^{\text{branca}}$ – volume de nitrato de prata adicionado à amostra “branca”.

$m_{\text{betão}}$ – Massa da toma de ensaio.

Na formulação acima mencionada, o teor de cloretos é dado por massa de betão, segundo a norma EN 14629:2007. Em caso de desconhecimento, assume-se que o betão apresenta na sua composição 14% de cimento e que todos os cloretos provêm do cimento. Como tal, para obter o teor de cloretos por massa de cimento, foi feito o quociente entre o valor de cloretos por massa de betão e os 14% de cimento estipulado pela norma EN 14629:2007.

Titulação Potenciométrica (B)

A determinação do teor de cloretos através da titulação potenciométrica consiste na preparação de uma solução de 1000 ml de AgNO_3 de concentração de 0,05 mol/L, pesando 8,4940g e registrando a massa. De seguida procede-se à padronização da solução no titulador automático (Figura 78) para que possa ser determinada a concentração rigorosa da concentração.

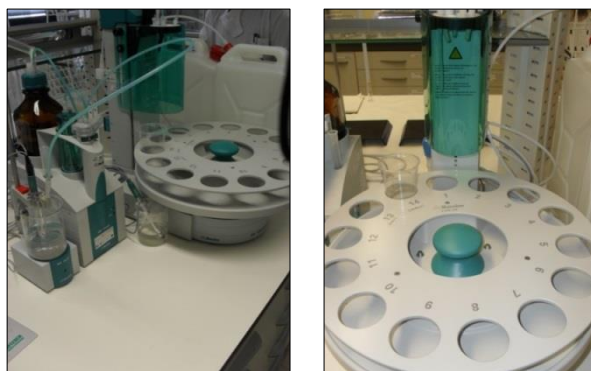


Figura 78 - Tituladora automática.

A padronização do nitrato de prata está concluída. Após este processo são introduzidos os sensores da tituladora automática no recipiente que contém a amostra filtrada, onde é inserido nitrato de prata.

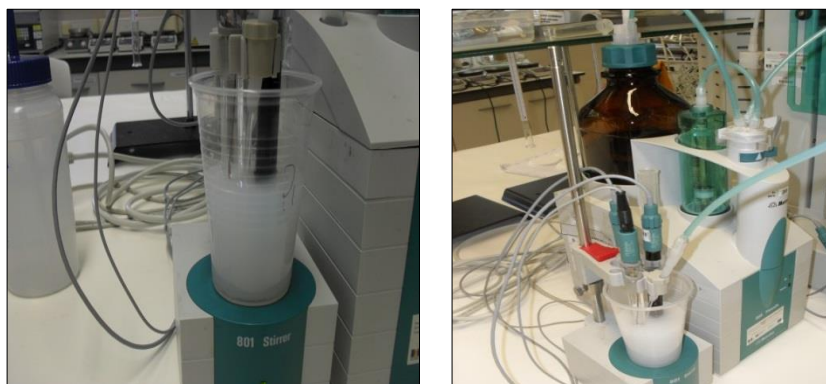


Figura 79 - Resultado final da adição de nitrato de prata na amostra e criação de cloreto de prata.

Através de reacções químicas, o nitrato de prata junta-se aos cloretos existentes na amostra, formando cloreto de prata, como podemos verificar na Figura 80.



Figura 80 - Resultado final da adição de nitrato de prata na amostra e criação de cloreto de prata.

Sabendo as concentrações e volumes introduzidos, a tituladora automática cria uma curva potenciométrica, que se trata de uma curva logarítmica, na qual é permitida a determinação do ponto de equivalência, através do ponto máximo da curva.

Como podemos verificar na Figura 81, a curva potenciométrica, que se apresenta de cor azul, tem o ponto máximo na zona delineada. Porém, sendo de difícil avaliação, recorre-se à derivada da curva potenciométrica, que se apresenta de cor rosa, para a determinação do ponto máximo de teor de cloretos no betão.

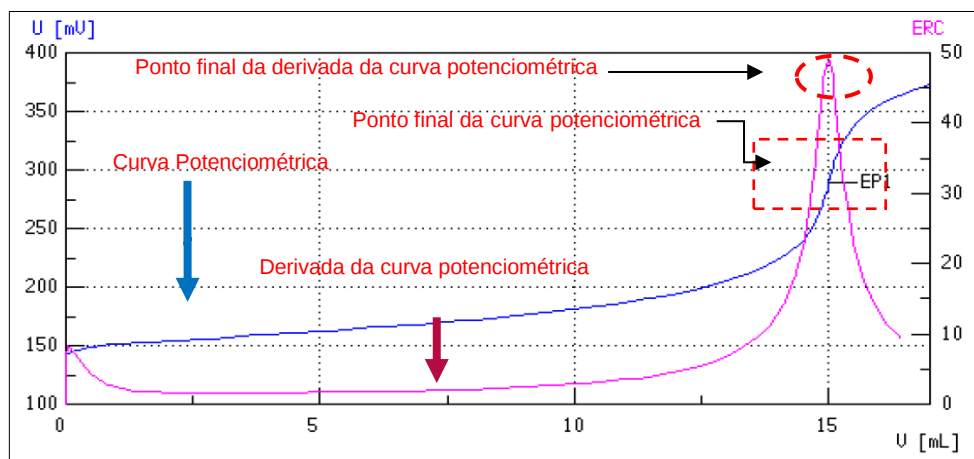


Figura 81 - Curva potenciométrica.

Resultados do ensaio de determinação do teor de cloretos

A Figura 82 faz a relação entre os valores obtidos no ensaio para a determinação do teor de cloreto presentes por massa de cimento. Como podemos observar o valor máximo obtido foi de 3,78% na carote nº22 e o valor mínimo foi de 0,412% na carote nº23. O quadro de valores referente ao Quadro 26 encontra-se em anexo na página 116.

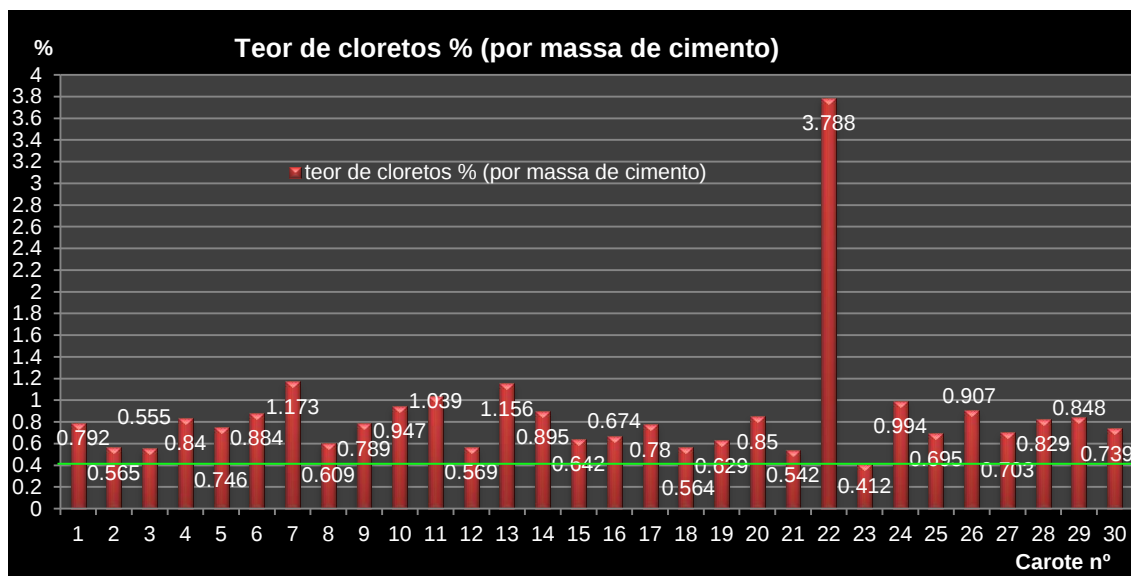


Figura 82 - Teor de cloretos por massa de cimento.

10.4 Discussão dos resultados obtidos

• Carbonatação

Através da análise à Figura 68, é possível verificar que existem casos onde a penetração do dióxido de carbono é feita em ambas as faces. Porém, existem casos onde a penetração é única e exclusivamente pela face exterior, o que leva a crer que os terrenos a tardoiz tiveram influência na protecção da face interior dos muros.

Em termos de valores máximos e mínimos, foram registados valores máximos para a carote n.º22, em ambas as faces (107mm e 45 mm), sendo que os valores de penetração mais baixos ocorreram nas carotes n.º 4 e 8 (30mm).

Como já referido anteriormente, foi executado o ensaio à resistência de compressão do betão às carotes carbonatadas. Apenas foi possível fazerem-se 3 ensaios, que não deixaram de verificar uma oscilação de resultados, entre os 12 MPa e 5 MPa.

• Teor de cloretos

A Figura 82 permite constatar que o teor de cloretos está acima do recomendado, pois a norma EN 2061-1 fixa o teor máximo de cloreto para o betão armado em 0.4% por massa de cimento, sendo que os valores obtidos encontram-se todos acima do limite recomendado.

A corrosão por cloretos provoca uma perda de secção nas armaduras e, consequentemente, uma perda de capacidade resistente à tracção por parte das

armaduras. Tal é possível verificar-se nos ensaios feitos à tracção dos varões provenientes do muro que ruiu (Quadro 22).



Figura 83 - Perda de secção por corrosão induzida pela presença de cloretos.

- **Efeito conjunto da carbonatação e presença de cloretos**

Como é possível verificar os muros de contenção estão sujeitos a dois fenómenos de acção lenta mas destrutiva.

Como os valores de carbonatação registados indicam ter havido um abaixamento de pH no betão. Como consequências deram-se a destruição da camada de passivação das armaduras e o aumento de fissuração, fazendo com que as armaduras ficassem vulneráveis a ataques de agentes nocivos, tais como os cloretos.

Através da destruição da camada de passivação e do aparecimento de fissuras provenientes da carbonatação, foi possível o acesso dos cloretos às armaduras, levando à corrosão das armaduras.

Os aspectos negativos registados provenientes da acção dos cloretos foram a perda de secção nos varões de aço e diminuição de capacidade resistente aos esforços de tracção e o aumento de volume das armaduras, provocando o destacamento do recobrimento, expondo ainda mais as armaduras ao meio ambiente.

Através dos aspectos negativos acima referidos é seguro dizer que houve uma actuação conjunta da carbonatação e dos cloretos, que resultou numa fragilização geral dos muros de contenção do complexo, levando inclusive à ruína de um dos muros.

Aspectos negativos no processo de construção

- **Recobrimento**

Foi possível detectar irregularidades na espessura de recobrimento e na execução do mesmo (Figura 84), que afectaram a protecção contra a corrosão.

Ainda verificou-se em vários muros a inexistência de recobrimento nas armaduras.



Figura 84 - Insuficiência de espessura de recobrimento.

- **Agregados utilizados**

Como é possível verificar através das imagens acima apresentadas e dos boletins do ensaio referente a carbonatação nota-se que foi utilizado basalto rolado na construção dos muros de contenção como é possível verificar pela Figura 85.



Figura 85 - Provete nº 16 do ensaio a carbonatação

- **Sistema drenagem**

É visível ao longo de todos os muros que este tem um sistema de drenagem deficiente sendo que muitos dos furos de drenagem encontram-se obstruídos agravando a possibilidade de penetração de agentes nocivos tais como o dióxido de carbono ou cloretos provenientes da atmosfera.

11 Conclusão

O caso prático apresentado permite uma reflexão sobre as ideias inicialmente apresentadas nesta dissertação.

A corrosão no betão armado por carbonatação e a presença de cloretos constituem um processo demorado, porém este tem um carácter destrutivo.

Os fenómenos de carbonatação e cloretos provocam nas estruturas de betão armado uma diminuição da capacidade resistente aos esforços de compressão e de tracção.

A carbonatação tem como campo de acção o betão. A difusão do dióxido de carbono para o interior do betão promove o abaixamento do pH que, posteriormente, tem implicações directas na destruição da camada de passivação promovida nas armaduras através da alta alcalinidade do betão.

Quanto aos cloretos, estes têm uma acção directa nas armaduras. A corrosão promovida por este fenómeno introduz várias patologias no betão armado, tais como destacamento, fendilhação, laminação do recobrimento. Estas patologias devem-se aos produtos da corrosão nos varões de aço, que fazem com que haja um aumento de volume das armaduras, originando tensões no interior do betão armado.

Outro aspecto negativo da actuação dos cloretos nas armaduras é a perda de secção nos varões de aço, o que tem implicações directas na performance das armaduras quando sujeitas a esforços de tracção.

A qualidade do recobrimento tem influência directa na durabilidade das estruturas de betão armado, sendo que este constitui, muitas vezes, a principal defesa contra agentes nocivos provenientes do meio ambiente. Deste modo, é possível afirmar que a qualidade do processo de construção tem um papel fundamental no combate à corrosão.

De acordo com a bibliografia utilizada, com as metodologias aplicadas e os resultados obtidos, verifica-se que no caso estudado existem situações onde a integridade dos muros está em causa, devido ao estado de degradação dos mesmos.

A origem dos valores de cloretos registados não foi alvo de uma investigação que permitisse a descoberta de uma resposta viável, porém, é possível apresentar algumas teorias sobre este facto.

O alto teor de cloretos registados no ensaio laboratoriais pode ter origem nos inertes utilizados na produção do betão.

A areia utilizada na produção do betão pode ter origem no mar, após a sua recolha este pode não ter tido a lavagem necessária para a remoção dos cloretos da sua composição, o que leva a crer que a presença dos cloretos não advém de uma penetração dos exterior para o interior do betão, a contaminação é feita através da utilização de inertes contaminados com cloretos ou seja trata-se de uma contaminação interna.

Outra teoria menos provável mas plausível é a transformação dos espaços verdes adjacentes aos muros em pequenos espaços agrícolas, no qual são utilizados alguns químicos que contenham cloretos que podem provocar a elevada contaminação de cloretos registados.

Por fim é possível equacionar uma contaminação dos muros por cloretos provenientes do meio ambiente marítimo, sendo que estes situam-se a cerca de meio quilómetro de distância do mar porém esta é uma teoria com uma fraca possibilidade de sucesso

Do ponto de vista académico a descoberta da origem dos cloretos pode ter elevada influência em casos futuros com características semelhantes podendo influenciar a técnica de reabilitação a utilizar em casos semelhantes.

Do ponto vista sociocultural e económico, a pesquisa para apurar a origem dos cloretos é inviável, pois no presente caso a demolição total e a reconstrução subsequente devem ser tidas em conta.

Tendo em conta que este trata-se de um trabalho de âmbito académico sugere-se a aplicação de uma técnica electroquímica para a reabilitação da estrutura onde a escolha pode recair sobre protecção catódica ou extracção de cloretos. De salientar que deve haver um aumento do recobrimento dos muros sendo que muitos destes não apresentam uma espessura mínima de recobrimento.

Porém é importante salientar que qualquer das técnicas electroquímicas acima mencionadas são demasiado perigosas sendo que estas envolvem o uso de corrente eléctrica numa zona onde existe uma grande movimentação de pessoas, isso aliado ao facto dos muros estarem situados numa zona que é notória pelos seus problemas sociais torna quase impossível garantir a segurança quer das pessoas quer do material utilizado na reabilitação dos muros de contenção.

Como considerações futuras, como já referido anteriormente, a nível académico pode ter grandes vantagens a descoberta da origem dos cloretos registados no ensaio laboratorial. Também na mesma linha pode ser feito um estudo aos factores externos (humidade relativa, concentração de dióxido de carbono, temperatura) que influenciam a carbonatação.

12 Referências bibliográficas

- Andrade, C. (2002). *Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras* (1ª Edição). São Paulo: PINI Editora.
- Amaral, L. (2012). *Teor crítico de cloretos para iniciação da corrosão do aço no betão*. (Dissertação de Mestrado). Instituto politécnico de Lisboa, Lisboa.
- Almusallam, A.; Khan, F.M.; Maslehuddin, M., 2002. "Performance of concrete coatings under varying exposure conditions", *Materials and Structures*, Vol. 35, pp. 487-494.
- Bhatt, C., Fonseca, J., Branco, M., & Palma, P. (2005). *Argamassa de reparação de estruturas de betão - Processos de construção*. Lisboa: Construlink press.
- Calister, W. D. (2002). *Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução*. Rio de Janeiro: Editora LTC.
- Cascudo, O. (1997). *O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeções técnicas eletroquímicas*. São Paulo: PINI Editora.
- Catarino, J. (2000). *Normalização Europeia no Âmbito da Reparação*. Seminário sobre Inspeção e Reparação de Estruturas de Betão Amado com Corrosão. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Ceukelaire, L., & Nieuwenburg, D. (1993). *Accelerated carbonation of a blast-furnace cement concrete*. *Cement and Concrete Research*, 23(2), 442-452.
- Chang, C., & Chen, J. (2006). *The experimental investigation of concrete carbonation depth*. *Cement and Concrete Research*, 36(9), 1760-1767.
- Cachim, P. (2012) "A especificação do betão Segundo NP EN 206-1". Universidade de Aveiro.
- Coito, M. P.S. (2008). *Avaliação probabilística da vida útil de estruturas de betão sob a acção da carbonatação e dos cloretos* (Dissertação de mestrado). Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Coutinho, M. (2005). *Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem*. FEUP edições, Porto.

Coutinho, J. S. 2006. *Materiais de construção 2 - 1ª parte - ligantes e caldas* 2002. Porto : Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil, 2006.

Costa, A. (2011). *Patologia do betão armado: Anomalias e mecanismos de deterioração*. Apoio a Unidade Curricular Reabilitação e Reforço de Estruturas. Universidade Técnica de Lisboa – IST, Lisboa.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BETON CEB “durable concrete structures: design guide”.1992.

Cunha, A. M. Q, & Helene, P. R. L. (2001). *Despassivação das armaduras de concreto por acção da carbonatação*. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo: EPUSP.

Decreto - Lei nº 349-C/83 de 30 de Julho. *Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado (REBAP)*. Diário da República, nº 174, 1ª série.

Dicionários Editora (2012). *Dicionário Editora da Língua Portuguesa*. Porto: Porto Editora.

Dugatto, F. (2006). *Corrosão de armaduras em concreto – estudo de caso* (Monografia Bacharel). União Dinâmica de Faculdades Cataratas – UDC, Foz do Iguaçu – Pr.

European Standard EN 1992-1-1, *Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*, English Version, December 2004.

Fédération Internationale du Béton (2007). *FIB Bulletin 40 - FRP Reinforcement in RC Structures*. Technical report, Task Group 9.3, Lausanne, Suíça.

Ferreira, R. (2000). *Avaliação de ensaios de durabilidade do betão* (Dissertação de Mestrado). Universidade do Minho, Guimarães.

Figueiredo, E. P. (2005). Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto. In Geraldo C. Isaia (Ed.), *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações* (Vol. 2, Cap. 27, pp.829 – 855). São Paulo: IBRACON.

Gentil, V. (2003). *Corrosão* (4ª ed.). Rio de Janeiro: Editora LTC.

GONÇALVES, A.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M. Procedimientos de reparación y protección de armaduras. Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón. São Paulo: Editores Paulo Helene e Fernanda Pereira, 2003

Gjorv, O., & Vennesland, O. (1979). *Diffusion of chlorides ions from seawater into concrete. Cement and Concrete Research*, 9, 229-238.

Helene, P. R. L. (1986). *Corrosão em armaduras para concreto armado*. São Paulo: PINI, Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

Helene, P. R. L. *Vida útil das Estruturas de Concreto*. In: IV Congresso Ibero americano de Patologia das Construções. Porto Alegre, RS, 1997.

Ho, D. W. S., & Lewis, R. K. (1987). *Carbonation of Concrete and its prediction, Cement and Concrete Research*, 17, 489-504.

Kazmierczak, C. S. (1995). *Contribuição para a análise da eficiência de películas aplicadas sobre as estruturas de concreto armado com o objectivo de protecção contra a carbonatação* (Tese de Doutoramento) Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Lagerblad, B. (2005). *Carbon dioxide uptake during concrete life cycle - state of the art*. Swedish Cement and Concrete Research Institute (CBI) report, Sweden.

Lança, P. (2011). *Conservação e reabilitação da construção*. Apoio a Unidade Curricular Conservação de Edifícios. Escola superior de Tecnologia e Gestão de Beja, Beja.

LNEC E-391. *Betões. Determinação da resistência à carbonatação*. LNEC, Lisboa, 2004.

LNEC E-464. *Betões. Metodologia prescritiva para a vida útil de projecto de 50 anos face às acções ambientais*. LNEC, Lisboa, 2004.

LNEC E-465. *Betão. Metodologia para estimar as propriedades de desempenho do betão armado ou pré-esforçado que permitem satisfazer a vida útil de projecto sob as exposições ambientais XC ou XS*. LNEC, Lisboa 2004.

LNEC E-378. *Guia para a utilização de ligantes hidráulicos*. LNEC, Lisboa, 2004.

Lopes, B. (2011). *Protecção superficial do betão. Influência da base no comportamento de produtos de impregnação*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Técnica de Lisboa – IST, Lisboa.

Medeiros, M. H. F., & Monteiro, E. B. (2002). *Utilização do nitrito de sódio como inibidor de corrosão em estrutura de betão armado sujeitas a acção dos iões de cloretos*. Engenharia Civil, Universidade do Minho, 15, 19-28.

Meyer, A. (1987). *The importance of the surface layer for the durability of concrete structures*. In: Concrete Durability, Katherine and Bryant Mather International conference (pp. 48–61), Detroit.

Minuzzi, F.(2007) *Corrosão nas armaduras do concreto armado prevenção e recuperação caso de estudo* (Trabalho de conclusão de curso). Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre 2007.

Monteiro, E. (2002). *Avaliação do método de extracção eletroquímica de cloretos para reabilitação de estruturas de concreto com problemas de corrosão das armaduras* (Tese de Doutoramento). Universidade de São Paulo, São Paulo.

Monteiro, I. (2010). *Modelação da evolução da carbonatação em elementos de betão armado* (Dissertação de Mestrado). Universidade Técnica de Lisboa – IST, Lisboa.

Neville, A. M. (1992). *Propriedades do concreto* (S. E. Giammus, Trad.). São Paulo: PINI.

Norma Portuguesa NP EN 206 “Especificação, desempenho, produção e conformidade” Junho 2007.

Norma Portuguesa NP EN 1992 “Projecto de Estruturas de Betão – parte 1-1: regras gerais e regras para edifícios ” Março 2010.

Norma portuguesa NP EN 1990 – “Bases para o projecto de estruturas” Dezembro 2009.

Norma europeia EN 12696 “Cathodic protection of steel in concrete” Julho 2000.

Norma europeia EN 14038-1 “Electrochemical re-alkalisation and chloride extraction treatments for reinforced concrete – Re-alkalisation” Fevereiro 2011.

Pereira, L., Cincotto, M. (2001). Determinação de Cloretos Em Concreto de Cimentos Portland: Influência do Tipo de Cimento. (Boletim Técnico). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Polito, G. (2006). *Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação*. (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Parrott L.J.; *A review of carbonation in reinforced concrete*, Cement and Concrete Association, ed. Slough, 1987

Salta, M. (1996). *Introdução à corrosão do aço no betão. Modelos de comportamento às acções agressivas*. Lisboa: LNEC.

Sandberg, P. (1995). *Critical evaluation of factors affecting chloride initiated reinforcement corrosion in concrete* (Licentiate thesis). University of Lund - Lund Institute of Technology - Division of Building Materials, Sweden.

Santana, J. (2012). *Protecção superficial do betão. Influência da humidade do suporte no desempenho de produtos de impregnação* (Dissertação de Mestrado). Universidade Técnica de Lisboa – IST, Lisboa.

Silva, F. (2006). *Estudo de concreto de alto desempenho frente à acção de cloretos* (Tese de Doutoramento). Universidade de São Paulo, São Paulo.

Silva, J. (2007). *Métodos electroquímicos para prevenção da deterioração e reparação de estruturas de betão armado: Protecção catódica, dessalinização e realcalinização* (Dissertação de Mestrado). Universidade Técnica de Lisboa – IST, Lisboa.

Simas, M. (2007). *Sistemas de protecção do betão face à carbonatação* (Dissertação de Mestrado). Universidade Técnica de Lisboa – IST, Lisboa.

Sousa, J. (2011). *Inspecção e reabilitação de estruturas segundo a NPEN1504 – Caso de obra* (Dissertação de Mestrado). Universidade do Porto – FEUP, Porto.

Tavares, L. (2006). *Estudo do processo de corrosão por íons cloreto no concreto armado utilizando armaduras comuns e galvanizadas* (Dissertação de Mestrado). Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Thomas, M., & Matthews, J. D. (1992). *Carbonation of fly ash concrete*. Magazine of Concrete Research, 44.

Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. Stockholm: Cement and Concrete Research Institute.

Varela, R. (2010). *Corrosão das armaduras em betão armado: Influência dos agentes cloretos e da carbonatação nas edificações de Cabo Verde* (Monografia de Licenciatura). Universidade Jean Piaget de Cabo Verde, Praia.

S. a, (2011). *Aditivos Expansores e Inibidores de Corrosão*, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

ANEXOS

Anexo A – Quadros e gráficos

Quadro 24 - Propriedades geométricas dos muros.

Designação do muro	Comprimento (m)	Altura (m)	Desaprumo (cm)	Inclinação (%)
M1 a M5	34,2	1.7	-2.0	-1.2
		2.6	-6.0	-2.3
		2.6	-4.5	-1.7
		3.3	-3.5	-1.1
		2.9	-4.0	-1.4
		3.6	-3.0	-0.8
		2.8	-3.0	-1.1
M6	9	2.1	-5.0	-2.3
M7	40,6	1.9	3.0	1.6
		3.8	7.0	1.8
		5.0	7.0	1.4
M8	25,3	5.0	7.0	1.4
		6.7	10.0	1.5
		6.2	12.0	1.9
M9	19,4	4.6	0.0	0.0
		4.9	0.0	0.0
		3.4	-12.0	-3.5
		4.0	-11.0	-2.8
		4.7	0.0	0.0
M10	16,9	4.8	-6.0	-1.3
		6.4	-4.5	-0.8
		6.4	-2.5	-0.5
		3.0	-5.0	-1.7
		3.0	-2.5	-0.8
		1.4	0.0	0.0
M11	21,6	5.6	-5.0	-0.9
		6.6	-7.5	-1.1
		6.6	-4.0	-0.6
		7.5	-5.0	0.7
M12	19,1	4.1	3.0	0.7
		3.9	-6.0	-1.5
		2.9	-4.5	-1.6
		2.3	-6.5	-2.8
M13a	20,2	3.8	-6.5	-1.7
M13b	23,8	2.3	2.5	1.1
		2.3	-1.5	-0.7
M14	13,4	5.2	5.0	1.0

		5.1	-7.5	-0.7
M14a	43,9	3.7	-2.5	-0.7
		3.6	-2.0	-0.6
		3.6	-1.5	-0.4
		2.5	-4.5	-1.8
		1.7	-1.0	-0.6
M15	34,2	3.6	-2.0	-0.6
		3.6	-19.0	-5.3
		4.1	-22.0	-5.4
		5.0	-31.5	-6.3
		5.0	-24.0	-4.8
		5.8	-24.0	-4.2
		4.5	-11.0	-2.4
		4.5	-5.0	-1.1
		4.6	-2.0	-0.4
M16	43,7	4.3	-3.0	-0.7
		4.1	-5.0	-1.2
		4.1	-4.5	-1.1
		4.0	-5.0	-1.3
		2.1	-1.0	-0.5
		1.2	2.0	1.7
		0.7	2.0	2.9
M17	23,1	3.4	-13.0	-3.8
		3.9	0	0.0
M18	25,9	3.3	-2.5	-0.8
		3.3	-1.0	-0.3
		4.7	-1.5	-0.3
		4.7	-1.0	-0.2
M19	9,3	4.7	-1.0	-0.2
		4.6	0	0.0
M20	24,2	5.0	-5.0	-1.0
		4.5	-4.5	-1.2
		4.2	-1.0	-0.5
M21	46,0	3.6	-4.5	-1.3
		3.1	-3.0	-1.0
		2.8	0.0	0.0
		2.8	-2.5	-0.9
		2.2	0.0	0.0
		1.2	2.0	1.7
		1.7	9.0	5.3
		3.0	10.0	3.4
M22	27,7	2.9	11.0	3.8
		3.0	3.0	1.0

		3.0	4.5	1.5
		3.0	4.0	1.3
		3.0	10.5	3.5
M23	7.9	3.0	9.0	3.0
		4.0	12.5	3.2
M24	37.6	4.0	12.5	3.2
		4.0	9.0	2.3
		4.0	7.0	1.8
		4.0	11.5	2.9
		4.0	11.5	2.9
		4.0	11.0	2.8
		4.0	11.0	2.8
		4.0	12.0	3.0
		4.0	5.0	1.2
		4.0	13.5	3.4

Quadro 25 - Resultados do ensaio à compressão de betão não contaminado.

Carote nº	Muro	Profundidade de carbonatação		Provete nº	Dimensões (mm)		Resistência à compressão	
		Face exterior	Face interior		Diâmetro	Altura		
1	M12	48	0	1.1	69	69	37.5	38.3
				1.2	69	70	39.0	
2		92	0	2.1	69	60	21.0	24.5
				2.2	69	70	26.0	
3	M12b	85	5	3.1	69	69	24.5	25.5
				3.2	69	70	26.5	
4	M13a	30	0	4.1	69	67	39.0	36.3
				4.2	69	69	33.5	
5	M14	47	0	5.1	69	69	28.0	29.0
				5.2	69	69	30.0	
6		37	0	6.1	69	69	28.0	28.8
				6.2	69	69	29.5	
7	M14a	33	0	7.1	69	69	28.0	31.0
				7.2	69	69	34.0	
8		30	0	8.1	69	69	37.0	34.3
				8.2	69	69	31.5	
9	M1	34	0	9.1	69	70	26.0	30.3
				9.2	69	72	34.5	
10	M4	80	0	10.1	69	69	19.5	19.8
				10.2	69	72	20.0	
11		62	0	11.1	69	73	27.0	25.8
				11.2	69	71	24.5	
12	M7	63	0	12.1	69	71	25.0	20.8
				12.2	69	68	16.5	
13	M8	47	0	13.1	69	69	33.5	32.5
				13.2	69	71	31.5	
14	M9b	55	6	14.1	69	69	27.0	29.5
				14.2	69	69	32.0	
15	M10	47	12	15.1	69	69	25.0	23.5
				15.2	69	69	22.0	
16		45	0	16.1	69	71	34.5	34.5
				16.2	69	71	34.5	
17	M11	38	0	17.1	69	70	40.0	27.5
				17.2	69	69	35.5	
18		56	0	18.1	69	69	36.5	38.5
				18.2	69	69	40.5	
19	M16	40	0	19.1	69	69	33.0	30.36.38

				19.2	69	69	39.5	
20	M15	45	0	20.1	69	69	31.5	2.3
				20.2	69	69	33.0	
21		90	0	21.1	99	69	20.0	18.8
				21.2	69	69	17.5	
22	M17	107	45	22.1	69	101	12.0	12.0
23		100	20	23.1	69	69	13	13.0
24		70	4	24.1	69	69	23	22.0
			24.2	69	70	21.0		
25	M18	35	0	25.1	69	71	36.5	33.0
				25.2	69	70	29.5	
26	M19	47	0	26.1	69	69	29.0	28.3
				26.2	69	69	27.5	
27	M20a	50	0	27.1	69	69	27.0	30.5
				27.2	69	69	34.0	
28	M20	46	0	28.1	69	69	24.0	29.5
				28.2	69	69	35.0	
29	M22	53	0	29.1	69	69	30.0	30.8
				29.2	69	69	31.5	
30	M21	35	0	30.1	69	69	27.0	28.8
				30.2	69	69	30.5	

Quadro 26 - Tabela de teor de cloretos.

Muro	Carote Nº	Teor de cloretos (%)	
		Por massa de betão	Por massa de cimento
M1	9	0.110	0.789
M4	10	0.133	0.947
M7	11	0.145	1.039
	12	0.080	0.569
M8	13	0.162	1.156
M9b	14	0.125	0.895
M10	15	0.09	0.642
M11	16	0.094	0.674
	17	0.109	0.78
M12	1	0.111	0.792
	2	0.079	0.565
M12b	3	0.078	0.555
M13a	4	0.118	0.84
M14	5	0.104	0.746
M14a	6	0.124	0.884
	7	0.164	1.173
	8	0.085	0.609
M15	20	0.119	0.85
	21	0.076	0.542
M16	18	0.079	0.564

	19	0.088	0.629
M17	22	0.53	3.788
	23	0.058	0.412
M18	25	0.097	0.695
M19	26	0.127	0.907
M20	28	0.116	0.829
M20a	27	0.098	0.703
M21	30	0.103	0.739
M22	29	0.119	0.848

Quadro 27 - Profundidade de carbonatação e Teor de cloretos por massa de cimento.

Muro	Carote Nº	Provete Nº	Profundidade carbonatação (mm)		Teor de cloretos (%)	
			ext	Int	Por massa de betão	Por massa de cimento
M1	9	9.1	34	0	0.11	0.789
		9.2				
M4	10	10.1	80	0	0.133	0.947
		10.2				
M7	11	11.1	62	0	0.145	1.039
		11.2				
	12	12.1	63	0	0.08	0.569
		12.2				
M8	13	13.1	47	0	0.162	1.156
		13.2				
M9b	14	14.1	55	6	0.125	0.895
		14.2				
M10	15	15.1	47	0	0.09	0.642
		15.2				
M11	16	16.1	45	0	0.094	0.674
		16.2				
	17	17.1	38	0	0.109	0.78
		17.2				
M12	1	1.1	48	0	0.111	0.792
		1.2				

	2	2.1	92	0	0.079	0.565
		2.2				
M12b	3	3.1	85	5	0.078	0.555
		3.2				
M13a	4	4.1	30	0	0.118	0.84
		4.2				
M14	5	5.1	47	0	0.104	0.746
		5.2				
M14a	6	6.1	37	0	0.124	0.884
		6.2				
	7	7.1	33	0	0.164	1.173
		7.2				
	8	8.1	30	0	0.085	0.609
		8.2				
M15	20	20.1	45	12	0.119	0.85
		20.2				
	21	21.1	90	0	0.076	0.542
		21.2				
M16	18	18.1	56	0	0.079	0.564
		18.2				
	19	19.1	40	0	0.088	0.629
		19.2				
M17	22	22.1	107	45	0.53	3.788
		22.2				
	23	23.1	100	20	0.058	0.412
		23.2				
M18	25	25.1	35	0	0.097	0.695
		25.2				
M19	26	26.1	47	0	0.127	0.907
		26.2				
M20	28	28.1	46	0	0.116	0.829
		28.2				
M20a	27	27.1	50	0	0.098	0.703
		27.2				
M21	30	30.1	35	0	0.103	0.739
		30.2				
M22	29	29.1	53	0	0.119	0.848
		29.2				

Quadro 28 - Classes de exposição ambiental (NP EN 206-1).

Designação da classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos de condições em que podem ocorrer as classes de exposição
1 - Nenhum risco de corrosão ou ataque		
X0	Para betão sem armadura ou elementos metálicos embebidos: todas as exposições excepto em situações de gelo/degelo, abrasão ou ataque químico Para betão com armadura ou elementos metálicos embebidos a seco	Betão no interior de edifícios com uma humidade do ar ambiente muito baixa
2 - Corrosão induzida por carbonatação		
XC1	Seco ou permanentemente húmido	Betão no interior de edifícios com baixa humidade do ar; Betão permanentemente submerso em água.
XC2	Húmido, raramente seco	Superfícies de betão sujeitadas a longos períodos de contacto com água; Muitas fundações.
XC3	Moderadamente húmido	Betão no interior de edifícios com moderada ou elevada humidade do ar; Betão no exterior protegido da chuva.
XC4	Ciclicamente húmido e seco	Superfícies de betão sujeitadas ao contacto com a água, fora do âmbito da classe XC2
3 - Corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar		
XD1	Moderadamente húmido	Superfícies de betão expostas a cloretos transportados pelo ar
XD2	Húmido, raramente seco	Piscinas; Betão exposto a águas industriais contendo cloretos
XD3	Ciclicamente húmido e seco	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	Ar transportando sais marinhos mas sem contacto directo com a água do mar	Estruturas na zona costeira ou na sua proximidade
XS2	Submersão permanente	Partes de estruturas marítimas
XS3	Zonas de marés, de rebentação ou de salpicos	Partes de estruturas marítimas
5 - Ataque pelo gelo/degelo com ou sem produtos descongelantes		
XF1	Moderadamente saturado de água, sem produtos descongelantes	Superfícies verticais de betão expostas à chuva e ao gelo
XF2	Moderadamente saturado de água, com produtos descongelantes	Superfícies verticais de betão de estruturas rodoviárias expostas ao gelo e a produtos descongelantes transportados pelo ar
XF3	Fortemente saturado, sem produtos descongelantes	Superfícies horizontais de betão expostas à chuva e ao gelo
XF4	Fortemente saturado, com produtos descongelantes	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	Ligeiramente agressivo, de acordo com o quadro 2 da norma EN 206-1	Terrenos naturais e água no terreno
XA2	Moderadamente agressivo, de acordo com o quadro 2 da norma EN 206-1	Terrenos naturais e água no terreno
XA3	Fortemente agressivo, de acordo com o quadro 2 da norma EN 206-1	Terrenos naturais e água no terreno

Anexo B – Boletins dos ensaios provenientes do caso prático

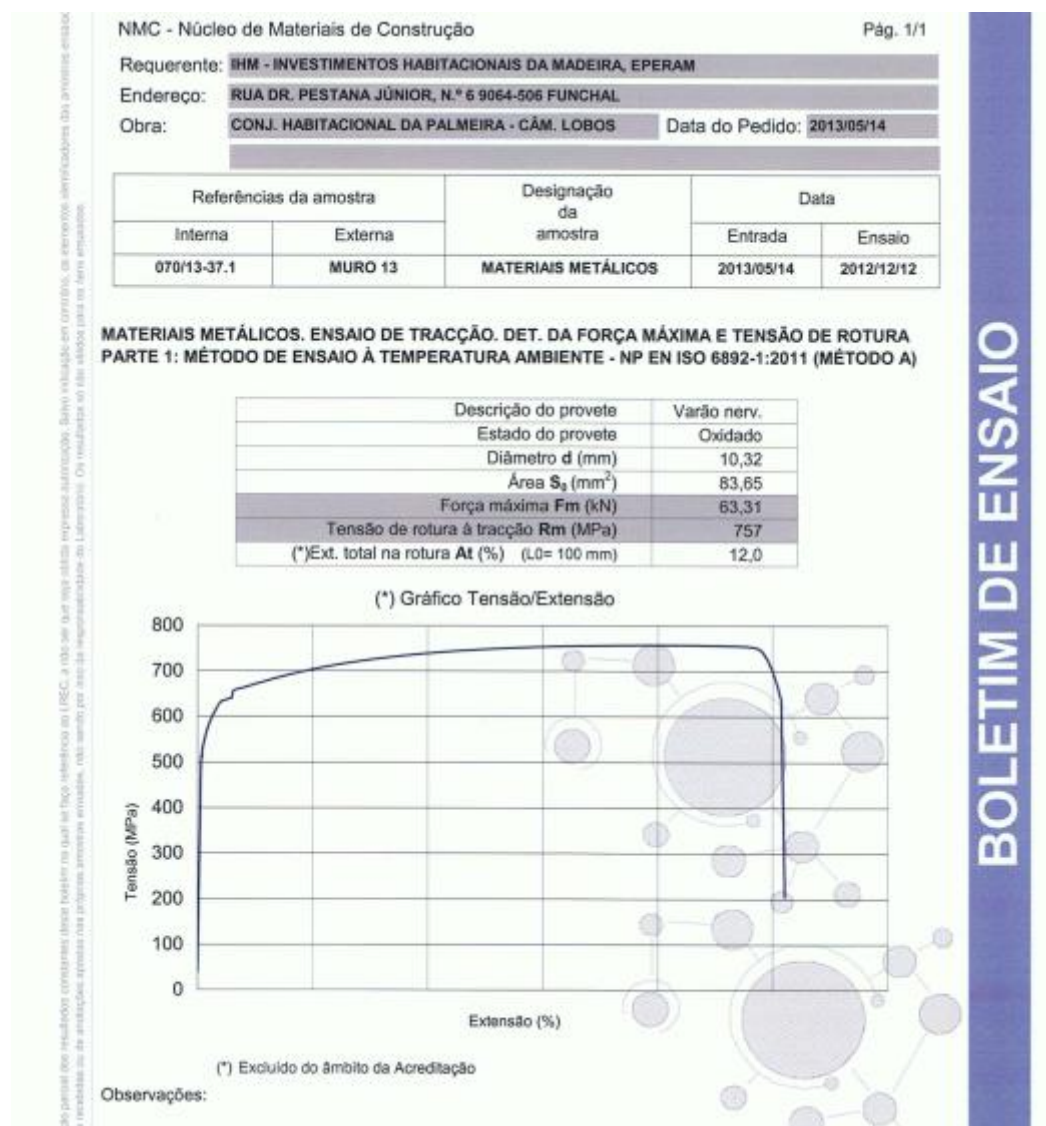


Figura 86 - Boletim do ensaio à tracção

NMC - Núcleo de Materiais de Construção

Pág. 1/1

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, N.º 6 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITACIONAL DA PALMEIRA - CÂM. LOBOS

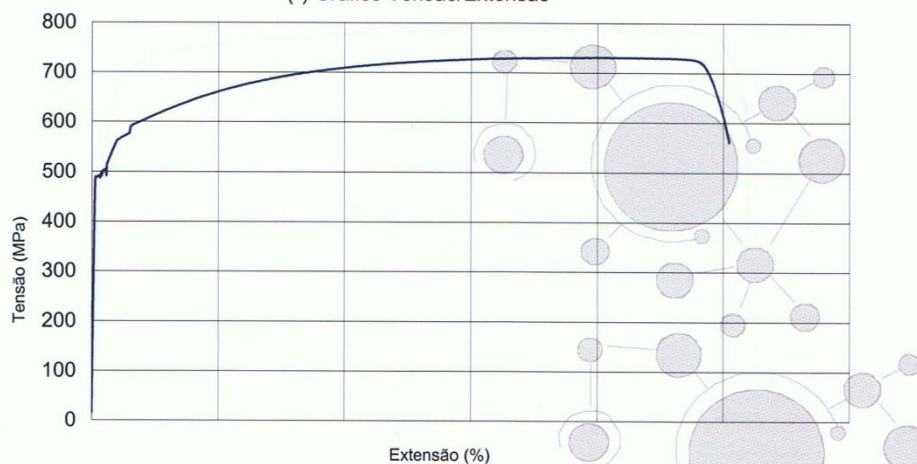
Data do Pedido: 2013/05/14

Referências da amostra		Designação da amostra	Data	
Interna	Externa		Entrada	Ensaio
070/13-37.2	MURO 13	MATERIAIS METÁLICOS	2013/05/14	2012/12/12

MATERIAIS METÁLICOS. ENSAIO DE TRACÇÃO. DET. DA FORÇA MÁXIMA E TENSÃO DE ROTURA
PARTE 1: MÉTODO DE ENSAIO À TEMPERATURA AMBIENTE - NP EN ISO 6892-1:2011 (MÉTODO A)

Descrição do provete	Varão nerv.
Estado do provete	Oxidado
Diâmetro d (mm)	10,50
Área S_0 (mm ²)	86,59
Força máxima F_m (kN)	63,24
Tensão de rotura à tracção R_m (MPa)	731
(*)Ext. total na rotura A_t (%) (L ₀ = 100 mm)	15,5

(*) Gráfico Tensão/Extensão



(*) Excluído do âmbito da Acreditação

Observações:

Figura 87 - Boletim do ensaio à tracção

NMC - Núcleo de Materiais de Construção

Pág. 1/1

Requerente: **IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM**

Endereço: **RUA DR. PESTANA JÚNIOR, N.º 6 9064-506 FUNCHAL**

Obra: **CONJ. HABITACIONAL DA PALMEIRA - CÂM. LOBOS**

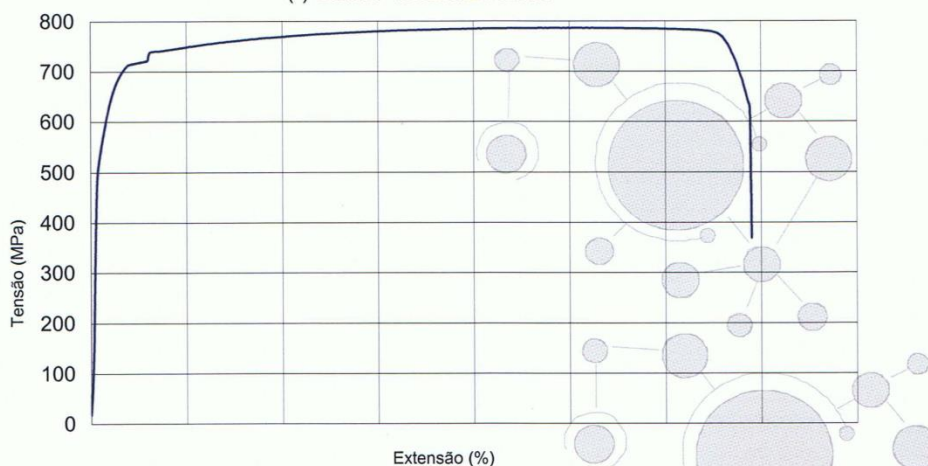
Data do Pedido: **2013/05/14**

Referências da amostra		Designação da amostra	Data	
Interna	Externa		Entrada	Ensaio
070/13-39	MURO 13	MATERIAIS METÁLICOS	2013/05/14	2012/12/12

**MATERIAIS METÁLICOS. ENSAIO DE TRACÇÃO. DET. DA FORÇA MÁXIMA E TENSÃO DE ROTURA
PARTE 1: MÉTODO DE ENSAIO À TEMPERATURA AMBIENTE - NP EN ISO 6892-1:2011 (MÉTODO A)**

Descrição do provete	Varão nerv.
Estado do provete	Oxidado
Diâmetro d (mm)	10,30
Área S_0 (mm ²)	83,32
Força máxima F_m (kN)	65,49
Tensão de rotura à tracção R_m (MPa)	786
(*)Ext. total na rotura A_t (%) (L0= 100 mm)	16,0

(*) Gráfico Tensão/Extensão



(*) Excluído do âmbito da Acreditação

Observações:

Figura 88 - Boletim do ensaio à tracção

igão parcial dos resultados constantes deste boletim na qual se faça referência ao LREC; a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras ensaiadas são as recebidas ou de anotações apostas nas próprias amostras enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do Laboratório. Os resultados só são válidos para os itens ensaiados.

NMC - Núcleo de Materiais de Construção

Pág. 1/1

Requerente: **IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM**

Endereço: **RUA DR. PESTANA JÚNIOR, N.º 6 9064-506 FUNCHAL**

Obra: **CONJ. HABITACIONAL DA PALMEIRA - CÂM. LOBOS**

Data do Pedido: **2013/05/14**

MURO 13

Resultados dos Ensaios

BETÃO. EXTRACÇÃO, EXAME E ENSAIO DE COMPRESSÃO DE CAROTES - NP EN 12504-1

BETÃO. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - NP EN 12390-3 (ANEXO B)

Máxima Dimensão Nominal do Agregado	Método usado para preparação	Condições de humidade superficial	Data de Carotagem
----	CORTE / DESBASTE	HÚMIDA	2012/12/11

Número do provete	Data		Idade (dias)	Dimensões			Secção A (mm²)	Massa (kg)	Rotura		Tipo de Fractura
	Fabrico	Ensaio		Ø (mm)	h (mm)	h/Ø			Força (KN)	Tensão (MPa)	
M13.1A	---	12/12/12	---	99	101	1,03	7660	1,808	159	21,0	Satisfatória
M13.1B	---	12/12/12	---	99	101	1,02	7682	1,827	156	20,5	Satisfatória
M13.2A	---	12/12/12	---	99	103	1,04	7668	1,854	230	30,0	Satisfatória
M13.2B	---	12/12/12	---	99	103	1,04	7674	1,872	330	43,0	Satisfatória
M13.3A	---	12/12/12	---	99	102	1,03	7685	1,834	250	32,5	Satisfatória
M13.3B	---	12/12/12	---	99	100	1,01	7712	1,826	217	28,0	Satisfatória

Observações:

BOLETIM DE ENSAIO

Figura 89 - Ensaio à compressão do betão do muro que ruíu.

NMC - Núcleo de Materiais de Construção

Pág. 1/6

Requerente: **IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM**

Endereço: **RUA DR. PESTANA JÚNIOR, N.º 6 9064-506 FUNCHAL**

Obra: **CONJ. HABITACIONAL DA PALMEIRA - CÂM. LOBOS** Data do Pedido: **2013/05/14**

Resultados dos Ensaios

BETÃO. EXTRACÇÃO, EXAME E ENSAIO DE COMPRESSÃO DE CAROTES - NP EN 12504-1

BETÃO. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - NP EN 12390-3 (ANEXO B)

Máxima Dimensão Nominal do Agregado	Método usado para preparação	Condições de humidade superficial	Data de Carotagem
----	CORTE / DESBASTE	HÚMIDA	2013/05/09

Número do provete	Data		Idade (dias)	Dimensões			Secção A (mm ²)	Massa (kg)	Rotura		Tipo de Fractura
	Fabrico	Ensaio		Ø (mm)	h (mm)	h/Ø			Força (KN)	Tensão (MPa)	
1.1	---	13/05/10	---	69	69	1,00	3770	0,640	141	37,5	Satisfatória
1.2	---	13/05/10	---	69	70	1,01	3772	0,659	146	39,0	Satisfatória
2.1	---	13/05/10	---	69	60	0,87	3773	0,523	80	21,0	Satisfatória
2.2	---	13/05/10	---	69	70	1,01	3784	0,633	98	26,0	Satisfatória
3.1	---	13/05/10	---	69	69	0,99	3777	0,614	93	24,5	Satisfatória
3.2	---	13/05/10	---	69	70	1,01	3787	0,636	100	26,5	Satisfatória
4.1	---	13/05/10	---	69	67	0,97	3773	0,614	147	39,0	Satisfatória
4.2	---	13/05/10	---	69	69	1,00	3784	0,633	126	33,5	Satisfatória
5.1	---	13/05/10	---	69	69	1,00	3777	0,588	106	28,0	Satisfatória
5.2	---	13/05/10	---	69	69	1,00	3774	0,629	114	30,0	Satisfatória
6.1	---	13/05/10	---	69	69	1,00	3782	0,641	106	28,0	Satisfatória
6.2	---	13/05/10	---	69	69	1,00	3775	0,617	112	29,5	Satisfatória

Observações:

BOLETIM DE ENSAIO

Figura 90 - Boletim do ensaio a compressão do betão.

NMC - Núcleo de Materiais de Construção

Pág. 2/6

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, N.º 6 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITACIONAL DA PALMEIRA - CÂM. LOBOS Data do Pedido: 2013/05/14

Resultados dos Ensaios

BETÃO. EXTRACÇÃO, EXAME E ENSAIO DE COMPRESSÃO DE CAROTES - NP EN 12504-1

BETÃO. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - NP EN 12390-3 (ANEXO B)

Máxima Dimensão Nominal do Agregado			Método usado para preparação			Condições de humidade superficial			Data de Carotagem		
-----			CORTE / DESBASTE			HÚMIDA			2013/05/07 2013/05/08 2013/05/09		
Número do provete	Data		Idade (dias)	Dimensões			Secção A (mm²)	Massa (kg)	Rotura		Tipo de Fractura
	Fabrico	Ensaio		Ø (mm)	h (mm)	h/Ø			Força (KN)	Tensão (MPa)	
7.1	---	13/05/10	---	69	69	0,99	3773	0,614	106	28,0	Satisfatória
7.2	---	13/05/10	---	69	69	0,99	3784	0,585	129	34,0	Satisfatória
8.1	---	13/05/09	---	69	69	0,99	3783	0,632	140	37,0	Satisfatória
*8.2	---	13/05/09	---	69	69	1,00	3782	0,660	120	31,5	Satisfatória
9.1	---	13/05/08	---	69	70	1,02	3762	0,658	98	26,0	Satisfatória
*9.2	---	13/05/08	---	69	72	1,05	3759	0,662	129	34,5	Satisfatória
10.1	---	13/05/08	---	69	69	0,99	3773	0,646	73	19,5	Satisfatória
**10.2	---	13/05/08	---	69	72	1,04	3764	0,659	76	20,0	Satisfatória
11.1	---	13/05/08	---	69	73	1,05	3776	0,668	102	27,0	Satisfatória
11.2	---	13/05/08	---	69	71	1,02	3776	0,633	92	24,5	Satisfatória
12.1	---	13/05/09	---	69	71	1,02	3776	0,621	95	25,0	Satisfatória
12.2	---	13/05/09	---	69	68	0,99	3769	0,579	62	16,5	Satisfatória

Observações: * Varão Ø 6 mm
** Varão Ø 12 mm

BOLETIM DE ENSAIO

Figura 91 - Boletim do ensaio a compressão.

Requerente: **IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM**Endereço: **RUA DR. PESTANA JÚNIOR, N.º 6 9064-506 FUNCHAL**Obra: **CONJ. HABITACIONAL DA PALMEIRA - CÂM. LOBOS** Data do Pedido: **2013/05/14****Resultados dos Ensaios**BETÃO. EXTRACÇÃO, EXAME E ENSAIO DE COMPRESSÃO DE CAROTES - NP EN 12504-1
BETÃO. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - NP EN 12390-3 (ANEXO B)

Máxima Dimensão Nominal do Agregado		Método usado para preparação		Condições de humidade superficial		Data de Carotagem	
-----		CORTE / DESBASTE		HÚMIDA		2013/05/08 2013/05/09	

Número do provete	Data		Idade (dias)	Dimensões			Secção A (mm²)	Massa (kg)	Rotura		Tipo de Fractura
	Fabrico	Ensaio		Ø (mm)	h (mm)	h/Ø			Força (KN)	Tensão (MPa)	
13.1	---	13/05/09	---	69	69	0,99	3772	0,556	127	33,5	Satisfatória
*13.2	---	13/05/09	---	69	71	1,03	3768	0,624	118	31,5	Satisfatória
14.1	---	13/05/09	---	69	69	0,99	3774	0,598	101	27,0	Satisfatória
14.2	---	13/05/09	---	69	69	1,00	3771	0,610	120	32,0	Satisfatória
15.1	---	13/05/09	---	69	69	0,99	3772	0,594	94	25,0	Satisfatória
15.2	---	13/05/09	---	69	69	1,00	3765	0,589	84	22,0	Satisfatória
16.1	---	13/05/09	---	69	71	1,03	3774	0,655	130	34,5	Satisfatória
16.2	---	13/05/09	---	69	71	1,02	3771	0,664	131	34,5	Satisfatória
17.1	---	13/05/10	---	69	70	1,01	3762	0,650	150	40,0	Satisfatória
17.2	---	13/05/10	---	69	69	1,00	3769	0,648	132	35,0	Satisfatória
18.1	---	13/05/10	---	69	69	0,99	3772	0,642	138	36,5	Satisfatória
18.2	---	13/05/10	---	69	69	1,00	3765	0,637	153	40,5	Satisfatória

Observações: * Varão Ø 12 mm

Figura 92 - Boletim do ensaio a compressão.

NMC - Núcleo de Materiais de Construção

Pág. 4/6

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, N.º 6 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITACIONAL DA PALMEIRA - CÂM. LOBOS

Data do Pedido: 2013/05/14

Resultados dos Ensaios

BETÃO. EXTRACÇÃO, EXAME E ENSAIO DE COMPRESSÃO DE CAROTES - NP EN 12504-1

BETÃO. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - NP EN 12390-3 (ANEXO B)

Máxima Dimensão Nominal do Agregado			Método usado para preparação			Condições de humidade superficial			Data de Carotagem		
----			CORTE / DESBASTE			HÚMIDA			2013/05/08 2013/05/09 2013/05/10		
Número do provete	Data		Idade (dias)	Dimensões			Secção A (mm ²)	Massa (kg)	Rotura		Tipo de Fractura
	Fabrico	Ensaio		Ø (mm)	h (mm)	h/Ø			Força (KN)	Tensão (MPa)	
19.1	---	13/05/10	---	69	71	1,03	3764	0,656	124	33,0	Satisfatória
19.2	---	13/05/10	---	69	69	1,00	3770	0,643	148	39,5	Satisfatória
20.1	---	13/05/09	---	69	69	0,99	3781	0,601	119	31,5	Satisfatória
20.2	---	13/05/09	---	69	69	0,99	3776	0,594	124	33,0	Satisfatória
21.1	---	13/05/09	---	69	69	0,99	3786	0,584	76	20,0	Satisfatória
21.2	---	13/05/09	---	69	69	0,99	3778	0,593	66	17,5	Satisfatória
22.1	---	13/05/13	---	99	101	1,01	7724	1,784	93	12,0	Satisfatória
23.1	---	13/05/13	---	69	68	0,99	3766	0,557	50	13,0	Satisfatória
24.1	---	13/05/13	---	69	69	1,00	3762	0,624	86	23,0	Satisfatória
24.2	---	13/05/13	---	69	70	1,01	3771	0,597	79	21,0	Satisfatória

Observações:

BOLETIM DE ENSAIO

Figura 93 - Boletim do ensaio a compressão.

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereco: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, N.º 6 9064-506 FUNCHAL

Obra: **CONJ. HABITACIONAL DA PALMEIRA - CÂM. LOBOS**

Data do Pedido: 2013/05/14

MURO 13

Resultados dos Ensaio

BETÃO. EXTRACÇÃO, EXAME E ENSAIO DE COMPRESSÃO DE CAROTES - NP EN 12504-1

BETÃO. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO - NP EN 12390-3 (ANEXO B)

Máxima Dimensão Nominal do Agregado	Método usado para preparação	Condições de humidade superficial	Data de Carotagem
-----	CORTE / DESBASTE	HÚMIDA	2012/12/11

[illegible]

Observações:

BOLETIM DE ENSAIO

Figura 94 - Boletim do ensaia à compressão do betão (carotes sobre o efeito de carbonatação).

Requerente: **IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA - EPERAM**
 Endereço: **RUA DR. PESTANA JÚNIOR, Nº6, 9064-506 FUNCHAL**
 Obra: **CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS** Data do Pedido: **14-05-2013**

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-1	1	070/13-1.3	BETÃO	14-05-2013	09-05-2013

Resultados dos Ensaios

Data de Recolha: **09-05-2013**

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	48	48	48
Interior	0	0	0



Observações:

Figura 95 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº1.

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, Nº6, 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS Data do Pedido: 14-05-2013

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-2	2	070/13-2.3	BETÃO	14-05-2013	09-05-2013

Resultados dos Ensaios

Data de Recolha: 09-05-2013

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	92	92	92
Interior	0	0	0



Observações:

Figura 96 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº2.

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, Nº6, 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS Data do Pedido: 14-05-2013

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-3	3	070/13-3.3	BETÃO	14-05-2013	09-05-2013

Resultados dos Ensaios

Data de Recolha: 09-05-2013

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	85	85	85
Interior	5	5	5



Observações:

Figura 97 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº3.

Remetente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, Nº6, 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS Data do Pedido: 14-05-2013

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-4	4	070/13-4.3	BETÃO	14-05-2013	09-05-2013

Resultados dos Ensaios

Data de Recolha: 09-05-2013

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	30	30	30
Interior	0	0	0



Observações:

BOLETIM DE ENSAIO

Figura 98 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº4.

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, N.º6, 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS Data do Pedido: 14-05-2013

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-5	5	070/13-5.3	BETÃO	14-05-2013	09-05-2013

Resultados dos Ensaio

Data de Recolha: 09-05-2013

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	47	47	47
Interior	0	0	0



Observações:

Figura 99 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº5.

placido parcial dos resultados constantes deste boletim na qual se faça referência ao LREC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras em informações recebidas ou de amostras apostas suas próprias amostras enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do Laboratório. Os resultados são válidos para os itens ensaiados.

NMC - Núcleo de Materiais de Construção

Pág. 1/1

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, Nº6, 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS

Data do Pedido: 14-05-2013

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-6	6	070/13-6.3	BETÃO	14-05-2013	09-05-2013

Resultados dos Ensaios

Data de Recolha: 09-05-2013

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	37	37	37
Interior	0	0	0



Observações:

BOLETIM DE ENSAIO

Figura 100 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº6.

NMC - Núcleo de Materiais de Construção

Pág. 1/1

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, Nº6, 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS Data do Pedido: 14-05-2013

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-7	7	070/13-7.3	BETÃO	14-05-2013	09-05-2013

Resultados dos Ensaios

Data de Recolha: 09-05-2013

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	33	33	33
Interior	0	0	0



Observações:

BOLETIM DE ENSAIO

Figura 101 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº7.

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, Nº6, 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS Data do Pedido: 14-05-2013

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-8	8	070/13-8.3	BETÃO	14-05-2013	08-05-2013

Resultados dos Ensaios

Data de Recolha: 08-05-2013

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	30	30	30
Interior	0	0	0



Observações:

Figura 102 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº8.

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, Nº6, 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS

Data do Pedido: 14-05-2013

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-9	9	070/13-9.3	BETÃO	14-05-2013	07-05-2013

Resultados dos Ensaios

Data de Recolha: 07-05-2013

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	34	34	34
Interior	0	0	0



Observações:

Figura 103 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº9.

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, Nº6, 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS Data do Pedido: 14-05-2013

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-10	10	070/13-10.3	BETÃO	14-05-2013	07-05-2013

Resultados dos Ensaios

Data de Recolha: 07-05-2013

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	80	80	80
Interior	0	0	0



Observações:

Figura 104 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº10.

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, N°6, 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS Data do Pedido: 14-05-2013

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-11	11	070/13-11.3	BETÃO	14-05-2013	07-05-2013

Resultados dos Ensaios

Data de Recolha: 07-05-2013

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	62	62	62
Interior	0	0	0



Observações:

Figura 105 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº11.

ção parcial dos resultados constantes deste boletim na qual se faça referência ao LREC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras e formações recebidas ou de análises efetuadas nas próprias amostras enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do laboratório. Os resultados são válidos para os itens ensaiados.

NMC - Núcleo de Materiais de Construção

Pág. 1/1

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, Nº6, 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS Data do Pedido: 14-05-2013

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-12	12	070/13-12.3	BETÃO	14-05-2013	08-05-2013

Resultados dos Ensaios

Data de Recolha: 08-05-2013

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	63	63	63
Interior	0	0	0



Observações:

BOLETIM DE ENSAIO

Figura 106 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº12.

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, Nº6, 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS Data do Pedido: 14-05-2013

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-13	13	070/13-13.3	BETÃO	14-05-2013	08-05-2013

Resultados dos Ensaios

Data de Recolha: 08-05-2013

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	47	47	47
Interior	0	0	0



Observações:

Figura 107 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº13.

NMC - Núcleo de Materiais de Construção

Pág. 1/1

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, Nº6, 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS Data do Pedido: 14-05-2013

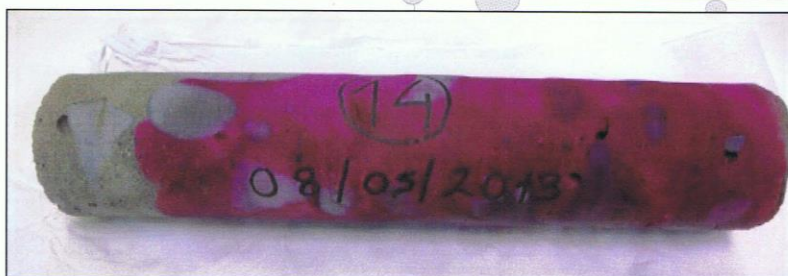
Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-14	14	070/13-14.3	BETÃO	14-05-2013	08-05-2013

Resultados dos Ensaios

Data de Recolha: 08-05-2013

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	55	55	55
Interior	6	6	6



Observações:

BOLETIM DE ENSAIO

Figura 108 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº14.

Remetente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, N.º 6, 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS Data do Pedido: 14-05-2013

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-15	15	070/13-15.3	BETÃO	14-05-2013	08-05-2013

Resultados dos Ensaios

Data de Recolha: 08-05-2013

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	47	47	47
Interior	12	12	12



Observações:

Figura 109 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº15.

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, Nº6, 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS Data do Pedido: 14-05-2013

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-16	16	070/13-16.3	BETÃO	14-05-2013	08-05-2013

Resultados dos Ensaios

Data de Recolha: 08-05-2013

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	45	45	45
Interior	0	0	0



Observações:

BOLETIM DE ENSAIO

Figura 110 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº16.

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, Nº6, 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS Data do Pedido: 14-05-2013

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-17	17	070/13-17.3	BETÃO	14-05-2013	09-05-2013

Resultados dos Ensaios

Data de Recolha: 09-05-2013

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	38	38	38
Interior	0	0	0



Observações:

Figura 111 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº17.

ação parcial dos resultados constantes deste boletim na qual se faça referência ao LREC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras e informações recebidas ou de análises apostas nas próprias amostras enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do laboratório. Os resultados são válidos para os itens ensaiados.

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, Nº6, 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS Data do Pedido: 14-05-2013

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-18	18	070/13-18.3	BETÃO	14-05-2013	09-05-2013

Resultados dos Ensaios

Data de Recolha: 09-05-2013

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	56	56	56
Interior	0	0	0



Observações:

Figura 112 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº18.

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, Nº6, 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS Data do Pedido: 14-05-2013

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-19	19	070/13-19.3	BETÃO	14-05-2013	09-05-2013

Resultados dos Ensaios

Data de Recolha: 09-05-2013

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	40	40	40
Interior	0	0	0



Observações:

Figura 113 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº19.

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, Nº6, 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS Data do Pedido: 14-05-2013

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-20	20	070/13-20.3	BETÃO	14-05-2013	08-05-2013

Resultados dos Ensaios

Data de Recolha: 08-05-2013

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	45	45	45
Interior	0	0	0



Observações:

Figura 114 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº20.

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, Nº6, 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS Data do Pedido: 14-05-2013

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-21	21	070/13-21.3	BETÃO	14-05-2013	08-05-2013

Resultados dos Ensaios

Data de Recolha: 08-05-2013

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	90	90	90
Interior	0	0	0



Observações:

Figura 115 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº21.

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, Nº6, 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS Data do Pedido: 14-05-2013

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-22	22	070/13-22.3	BETÃO	14-05-2013	10-05-2013

Resultados dos Ensaio

Data de Recolha:	10-05-2013
------------------	------------

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	107	107	107
Interior	1	23	45



Observações:

o parcial dos resultados constantes deste boletim na qual se faça referência ao IREC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras e das análises recebidas ou de anotações apostas nas próprias amostras enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do Laboratório. Os resultados só são válidos para os itens ensaiados.

BOLETIM DE ENSAIO

Figura 116 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº22.

ação parcial dos resultados constantes deste boletim na qual se faça referência ao LREC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras e informações recebidas ou de anotações apontadas nas próprias amostras enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do Laboratório. Os resultados são válidos para os itens ensaiados.

NMC - Núcleo de Materiais de Construção

Pág. 1/1

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, Nº6, 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS Data do Pedido: 14-05-2013

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-23	23	070/13-23.3	BETÃO	14-05-2013	10-05-2013

Resultados dos Ensaios

Data de Recolha: 10-05-2013

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	100	100	100
Interior	20	20	20



Observações:

BOLETIM DE ENSAIO

Figura 117 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº23.

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, Nº6, 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS Data do Pedido: 14-05-2013

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-24	24	070/13-24.3	BETÃO	14-05-2013	10-05-2013

Resultados dos Ensaios

Data de Recolha: 10-05-2013

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	70	70	70
Interior	4	4	4



Observações:

Figura 118 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº24.

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, Nº6, 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HAB. PALMEIRA - CÂM. LOBOS Data do Pedido: 14-05-2013

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-25	25	070/13-25.3	BETÃO	14-05-2013	10-05-2013

Resultados dos Ensaios

Data de Recolha: 10-05-2013

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	35	35	35
Interior	0	0	0



Observações:

Figura 119 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº25.

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, Nº6, 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS Data do Pedido: 14-05-2013

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-26	26	070/13-26.3	BETÃO	14-05-2013	10-05-2013

Resultados dos Ensaios

Data de Recolha: 10-05-2013

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	47	47	47
Interior	0	0	0



Observações:

Figura 120 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº26.

lo parcial dos resultados constantes deste boletim na qual se faça referência ao LREC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras e as marcações recetadas ou de anotações apostas nas próprias amostras enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do Laboratório. Os resultados só são válidos para os itens ensaiados.

NMC - Núcleo de Materiais de Construção

Pág. 1/1

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, Nº6, 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS Data do Pedido: 14-05-2013

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-27	27	070/13-27.3	BETÃO	14-05-2013	10-05-2013

Resultados dos Ensaios

Data de Recolha: 10-05-2013

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	50	50	50
Interior	0	0	0



Observações:

BOLETIM DE ENSAIO

Figura 121 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº27.

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM
 Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, Nº6, 9064-506 FUNCHAL
 Obra: CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS Data do Pedido: 14-05-2013

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-28	28	070/13-28.3	BETÃO	14-05-2013	10-05-2013

Resultados dos Ensaios

Data de Recolha: 10-05-2013

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	46	46	46
Interior	0	0	0



Observações:

Figura 122 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº28.

ação parcial dos resultados constantes deste boletim na qual se faça referência ao LREC, a não ser que seja obtida expressa autorização. Salvo indicação em contrário, os elementos identificadores das amostras em formações recebidas ou de análises apostas nas próprias amostras enviadas, não sendo por isso da responsabilidade do Laboratório. Os resultados são válidos para os itens ensaiados.

NMC - Núcleo de Materiais de Construção

Pág. 1/1

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, Nº6, 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS Data do Pedido: 14-05-2013

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-29	29	070/13-29.3	BETÃO	14-05-2013	09-05-2013

Resultados dos Ensaios

Data de Recolha: 09-05-2013

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	53	53	53
Interior	0	0	0



Observações:

BOLETIM DE ENSAIO

Figura 123 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº29.

Requerente: IHM - INVESTIMENTOS HABITACIONAIS DA MADEIRA, EPERAM

Endereço: RUA DR. PESTANA JÚNIOR, Nº6, 9064-506 FUNCHAL

Obra: CONJ. HABITAC. PALMEIRA - CÂM. LOBOS Data do Pedido: 14-05-2013

Referências da amostra		Referência da amostra laboratorial	Designação da amostra	Data	
Interna	Externa			Entrada	Ensaio
070/13-30	30	070/13-30.3	BETÃO	14-05-2013	09-05-2013

Resultados dos Ensaios

Data de Recolha: 09-05-2013

BETÃO. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO - LNEC E 391:1975

Face	Profundidade de Carbonatação		
	Mínimo (mm)	Médio (mm)	Máximo (mm)
Exterior	1	18	35
Interior	0	0	0



Observações:

Figura 124 - Boletim de ensaio a carbonatação carote nº30.

Anexo D – Desenhos e plantas

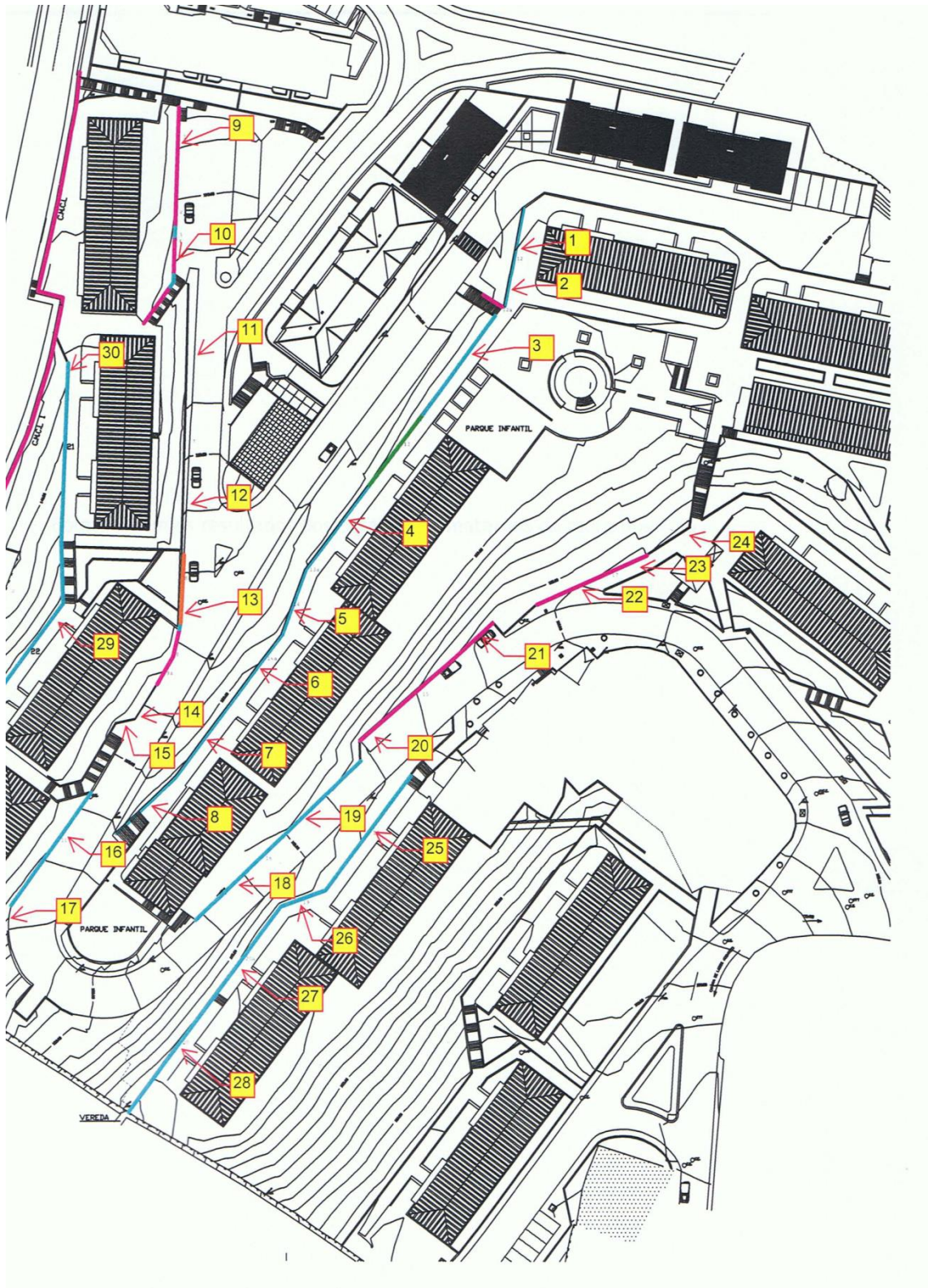


Figura 125 - Planta de ligação dos pontos de recolha das carotes.

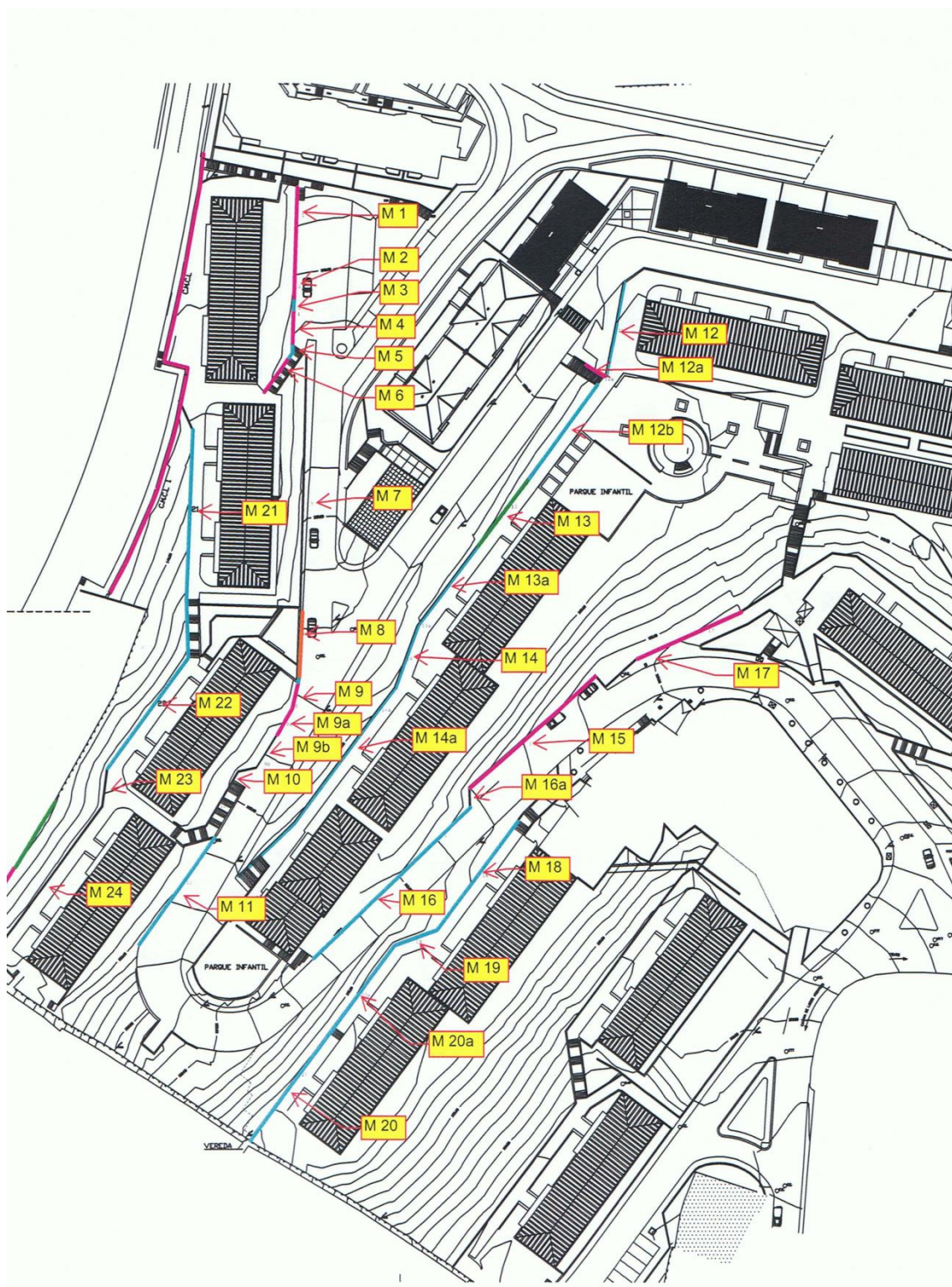


Figura 126 - Planta de identificação dos muros.