



## **Proteção e Reabilitação de Estruturas de Betão Armado**

**JOSÉ JORGE ALMEIDA RODRIGUES**

(Licenciado em Engenharia Civil)

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Civil

Orientador:

Especialista João António Antunes Hormigo

Júri:

Presidente: Doutor Pedro Miguel Soares Raposeiro da Silva

Vogais:

Doutora Maria Idália da Silva Gomes

Especialista João António Antunes Hormigo

**Junho de 2017**



## RESUMO

A reabilitação dos edifícios tem vindo a crescer de forma acentuada no setor da construção civil nos últimos anos, sobretudo devido à elevada idade de uma parte significativa dos edifícios portugueses. Por outro lado, nas estruturas e edifícios mais recentes é necessário definir estratégias por forma a minimizar a necessidade de manutenção através da prevenção das patologias que provocam a degradação das estruturas e consequentemente aumentam os custos com a reabilitação dos edifícios.

O presente trabalho tem como objetivo fazer um resumo das principais patologias que se podem encontrar em estruturas de betão armado, com destaque para a carbonatação do betão e o ataque dos cloretos, e dos ensaios que se podem usar *in situ* para detetar ou determinar as causas das patologias. Pretende-se também enunciar algumas das técnicas de proteção, reforço e reparação de estruturas de betão armado, tendo em consideração a norma NP EN 1504 que define os produtos e sistemas para a proteção e reparação das estruturas de betão.

Neste trabalho também se aborda o tema da autorreparação do betão que, embora seja um tema ainda em desenvolvimento e investigação, tem gerado um aumento de interesse por parte de todos os intervenientes na área da engenharia civil e que pode revelar-se bastante útil na reparação de microfissuras protegendo as estruturas da entrada de agentes agressivos.

Por fim, efetuar-se-á o estudo de um caso prático, elaborando fichas de inspeção e diagnóstico de patologias no betão armado de um edifício e fichas de reparação para sugerir métodos de proteção ou reparação e produtos de acordo com os requisitos da norma.

**Palavras-chave:** *Betão Armado, Patologias do Betão Armado, Corrosão, Carbonatação, Cloretos, Ensaios de Betão, NP EN 1504, Betão Autorreparável.*



## ABSTRACT

The rehabilitation of buildings has been growing sharply in the civil construction sector in recent years, mainly due to the high age of a significant part of Portuguese buildings. On the other hand, in more recent structures and buildings it is necessary to define strategies in order to minimize the need for maintenance by preventing the pathologies that cause the degradation of the structures and consequently increase the costs with the rehabilitation of the buildings.

The present work aims to summarize the main pathologies that can be found in reinforced concrete structures, especially the carbonation of concrete and the attack of chlorides, and the tests that can be used in situ to detect or determine the causes of pathologies. It is also intended to outline some of the techniques of protection, reinforcement and repair of reinforced concrete structures, taking into account the standard NP EN 1504 that defines the products and systems for the protection and repair of concrete structures.

This work also addresses the subject of self-healing concrete which, although it is a topic still under development and research, has generated an increase of interest on the part of all the actors in the area of civil engineering and that can prove very useful in the repair of microcracks protecting the structures of aggressive agents.

Finally, the study of a practical case will be done, elaborating sheets of inspection and diagnosis of pathologies in the concrete of a building and repair sheets to suggest methods of protection or repair and products according to the requirements of the standard.

**Key words:** *Reinforced Concrete, Reinforced Concrete Pathologies, Corrosion, Carbonation, Chlorides, Concrete Tests, EN 1504, Self-healing Concrete.*



## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Professor João Hormigo pela sua disponibilidade, por ter aceitado ser o orientador científico deste trabalho, pelos conhecimentos, sugestões, conselhos e apoio ao longo da realização deste trabalho.

Quero agradecer também aos meus colegas de trabalho que permitiram uma maior flexibilidade do horário de forma a permitir que tivesse tempo para assistir às aulas da licenciatura e do mestrado.

Gostaria também de agradecer aos professores e colegas do ISEL que também contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho através dos conhecimentos transmitidos e partilhados ao longo do curso.

Agradeço de forma particular aos meus Pais e ao meu Irmão por me terem apoiado sempre durante o meu percurso académico, pelo incentivo e carinho que sempre demonstraram.



## **SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS**

**a/c** – Razão água-cimento

**AgCl** – Cloreto de prata

**AgNO<sub>3</sub>** – Nitrato de prata

**C** – Dosagem de cimento

**C<sub>3</sub>A** – Aluminato tricálcico

**C<sub>4</sub>AF** – Aluminoferrato tetracálcico

**Ca<sup>2+</sup>** – Ião cálcio

**Ca(OH)<sub>2</sub>** – Hidróxido de cálcio

**CaCl<sub>2</sub>** – Cloreto de cálcio

**CaCO<sub>3</sub>** – Carbonato de cálcio

**C<sub>Cl<sup>-</sup></sub>** – Concentração de íons cloreto

**Cl<sup>-</sup>** – Ião cloreto

**CFRP** – Carbon fiber–reinforced polymer

**CO<sub>2</sub>** – Dióxido de carbono

**CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>** – Ião carbonato

**C<sub>OH<sup>-</sup></sub>** – Concentração de íons hidróxido

**C<sub>s</sub>** – Concentração de cloretos à superfície

**CSH** – Silicato de cálcio hidratado

**D** – Coeficiente de difusão de cloretos

**e<sup>-</sup>** – Electrões

**ECC** – Engineered Cementitious Composites

**erf** – Função erro

**f<sub>c28</sub>** – Resistência à compressão característica aos 28 dias

**Fe(OH)<sub>3</sub>** – Hidróxido de ferro (II)

**Fe(OH)<sub>2</sub>** – Hidróxido de ferro (III)

**Fe<sup>2+</sup>** – Ião ferro

**Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** – Óxido de ferro (III)

**Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>** – Óxido de ferro (II, III)

**FeCl<sub>2</sub>** – Cloreto de ferro (II)

**FRP** – Fibre-reinforced plastic

**GFRP** – Glass fiber-reinforced polymer

**H<sup>+</sup>** – Ião hidrogénio

**HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>** – Ião bicarbonato

**H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>** – Ácido carbónico

**H<sub>2</sub>O** – Molécula de água

**H<sub>2</sub>S** – Sulfureto de hidrogénio / ácido sulfídrico

**HR** – Humidade relativa

**ISO** – International Organization for Standardization

**KOH** – Hidróxido de potássio

**LNEC** – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

**MAEC** – Método de Avaliação do Estado de Conservação de Edifícios

**MMO** – Mixed Metal Oxides

**MR** – Método de reparação

**NaOH** – Hidróxido de sódio

**NP EN** – Versão portuguesa de uma norma europeia

**O<sub>2</sub>** – Molécula de oxigénio

**OH<sup>-</sup>** – Ião hidróxido

**pH** – Potencial hidrogeniónico

**RBLH** – Regulamento de Betões de Ligantes Hidráulicos

**REBAP** – Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado

**SO<sub>2</sub>** – Dióxido de enxofre

**T** – Temperatura

**Ti** – Titanium

**XC** – Classe de exposição ambiental para o risco de corrosão induzida por carbonatação

**Xc** – Profundidade de carbonatação

**XD** – Classe de exposição ambiental para o risco de corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar

**XS** – Classe de exposição ambiental para o risco de corrosão induzida por cloretos da água do mar

# Índice

RESUMO .....	i
ABSTRACT .....	iii
AGRADECIMENTOS.....	v
SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS.....	vii
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento do tema .....	1
1.2. Objetivo.....	3
1.3. Estrutura da Dissertação .....	4
<b>2. PATOLOGIAS DO BETÃO ARMADO.....</b>	<b>5</b>
2.1. Introdução.....	5
2.2. Patologias na fase de construção.....	5
2.2.1. Erros de geometria .....	5
2.2.2. Segregação do betão, vazios e zonas porosas .....	5
2.2.3. Descontinuidades visíveis no betão .....	6
2.2.4. Manchas no betão.....	6
2.2.5. Fissuração .....	7
2.3. Patologias Estruturais.....	8
2.3.1. Fissuração devida às ações das cargas de cálculo.....	8
2.3.2. Fissuração devida a tração ou compressão simples.....	9
2.3.3. Fissuração devida a flexão simples, esforço transversal ou torsão .....	9
2.3.4. Fissuração devida a ações termo-higrométricas.....	10
2.3.5. Fissuração devida aos assentamentos diferenciais de apoios .....	10
2.3.6. Fissuração devida às ações resultantes de acidentes .....	10
2.4. Patologias de Durabilidade.....	11
2.4.1. Coloração do betão.....	11
2.4.2. Fissuração e desagregação do betão por ciclo gelo/degelo.....	11
2.4.3. Fissuração e desagregação do betão pelas reações álcalis-sílica .....	11
2.4.4. Fissuração e desagregação do betão geradas pelo ataque de sulfatos ou ácidos .....	12
2.4.5. Desagregação do betão por erosão.....	13
<b>3. CORROSÃO DAS ARMADURAS NO BETÃO ARMADO .....</b>	<b>15</b>
3.1. O fenómeno da corrosão .....	16
3.2. Fatores que induzem a corrosão nos elementos de betão armado .....	18
3.2.1. Corrosão induzida pela carbonatação.....	18
3.2.2. Fatores que influenciam a velocidade de carbonatação.....	21
3.2.2.1. Concentração de CO <sub>2</sub> .....	22

3.2.2.2.	Humidade relativa.....	23
3.2.2.3.	Temperatura .....	24
3.2.2.4.	Razão água-cimento .....	24
3.2.2.5.	Compactação e cura .....	25
3.2.2.6.	Classe de resistência .....	26
3.2.2.7.	Fissuras.....	27
3.2.3.	Corrosão induzida por cloretos.....	27
3.2.3.1.	Mecanismos de transporte e influência das condições de exposição.....	30
3.2.3.2.	Limite crítico de cloretos .....	32
3.2.3.3.	Fatores que influenciam o coeficiente de difusão de cloretos .....	35
3.3.	Ação conjunta de cloretos e carbonatação .....	39
4.	MÉTODOS DE INSPEÇÃO E ENSAIO .....	41
4.1.	Introdução.....	41
4.2.	Inspeção visual.....	42
4.3.	Ensaaios <i>in situ</i> .....	43
4.3.1.	Ensaaios não-destrutivos .....	44
4.3.1.1.	Ensaio esclerométrico.....	44
4.3.1.2.	Ensaio de ultrassons .....	47
4.3.1.3.	Ensaio de termografia .....	52
4.3.1.4.	Ensaio de deteção das armaduras, seu diâmetro e recobrimento .....	54
4.3.2.	Ensaaios destrutivos .....	55
4.3.2.1.	Ensaio de Arrancamento (Pull-Out).....	55
4.3.2.2.	Ensaio de arrancamento por tração direta (Pull-Off).....	57
4.3.2.3.	Ensaio de determinação da profundidade da carbonatação .....	59
4.3.2.4.	Ensaio de determinação do teor de cloretos.....	60
5.	A NORMA NP EN 1504.....	63
5.1.	Introdução.....	63
5.2.	Estrutura da norma .....	63
5.3.	Aplicabilidade da norma .....	65
5.4.	Princípios e métodos de proteção, reparação e reforço .....	71
6.	PROTECÇÃO, REPARAÇÃO E REFORÇO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO .....	73
6.1.	Técnicas de proteção .....	73
6.1.1.	Impregnações para proteção do betão.....	75
6.1.2.	Pinturas para proteção do betão.....	75
6.1.3.	Revestimentos e membranas para proteção do betão .....	76
6.1.4.	Selagem de juntas para proteção do betão.....	76
6.1.5.	Proteção das armaduras contra a corrosão induzida por cloretos .....	76

6.1.6.	Proteção catódica das armaduras .....	77
6.1.7.	Proteção das armaduras contra a corrosão induzida por carbonatação .....	78
6.1.8.	Proteção do betão contra o ataque químico .....	79
6.1.9.	Proteção do betão contra os ciclos gelo-degelo .....	79
6.2.	Técnicas de reparação.....	79
6.2.1.	Reparação de fendas .....	80
6.2.2.	Reparação de vazios e zonas porosas.....	81
6.2.3.	Reparação de descasques e zonas fragmentadas .....	82
6.3.	Técnicas de reforço.....	86
6.3.1.	Reforço por encamisamento com betão armado .....	87
6.3.2.	Reforço por adição de chapas coladas.....	88
6.3.3.	Reforço por adição de elementos de FRP.....	90
6.3.4.	Reforço com perfis metálicos.....	92
6.3.5.	Reforço por introdução de pré-esforço exterior .....	93
6.3.6.	Reforço por introdução de novos elementos estruturais.....	94
6.3.7.	Reforço através da criação ou eliminação de ligações internas.....	94
6.3.8.	Reforço através da introdução de deslocamentos impostos .....	95
7.	AUTORREPARAÇÃO DO BETÃO .....	97
7.1.	Introdução.....	97
7.2.	Autorreparação com recurso à utilização de cápsulas ou fibras ocas contendo agentes químicos.....	97
7.3.	Autorreparação por hidratação posterior .....	100
7.4.	Autorreparação com recurso a bactérias.....	103
7.5.	Considerações finais sobre o tema .....	104
8.	ESTUDO DE CASO.....	107
8.1.	Caracterização do edifício .....	107
8.1.1.	Localização.....	107
8.1.2.	Descrição geral do edifício .....	108
8.1.3.	Estado de conservação do edifício.....	108
8.2.	Identificação e caracterização das patologias.....	108
8.2.1.	Patologias no betão armado .....	109
8.2.1.1.	Infiltrações .....	109
8.2.1.2.	Humidades Ascensionais.....	110
8.2.1.3.	Eflorescências e Criptoflorescências.....	111
8.2.1.4.	Destacamento do betão .....	112
8.2.1.5.	Fissuração .....	113
8.3.	Propostas de resolução das patologias.....	114
8.3.1.	Fendas e Fissurações .....	114

8.3.2.	Infiltrações .....	115
8.3.3.	Humidades Ascensionais, Eflorescências e Criptoflorescências.....	115
8.3.4.	Destacamento do betão .....	115
9.	CONCLUSÕES .....	117
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	119
	ANEXOS .....	127

**Anexo I – Fichas de Inspeção e Ficha de Reparação**

**Anexo II – Ficha de Avaliação do Estado de Conservação**

**Anexo III – Fichas Técnicas**

**Anexo IV – Fichas de Inspeção (Estudo de Caso)**

**Anexo V – Fichas de Reparação (Estudo de Caso)**

**Anexo VI – Ficha de Avaliação do Estado de Conservação (Estudo de Caso)**

**Nota: Os Anexos IV, V e VI encontram-se apenas disponíveis em formato digital.**

## Índice de Figuras

Figura 2.1 - Erros de geometria entre pilares .....	5
Figura 2.2 - Vazios no betão .....	6
Figura 2.3 - Descontinuidades visíveis numa estrutura de betão .....	6
Figura 2.4 - Manchas de eflorescências visíveis no betão .....	7
Figura 2.5 - Aspeto genérico de fissuras devido a cargas de cálculo .....	8
Figura 2.6 - Esquema de rotura por tração simples (A) e por compressão simples (B) .....	9
Figura 2.7 - Esquema de rotura por flexão simples com esforço transversal .....	9
Figura 2.8 - Esquema de rotura de um elemento de betão por torsão .....	10
Figura 2.9 - Fissuração devida a assentamentos diferenciais de apoios .....	10
Figura 2.10 - Fissuração devida a reação álcali-silica .....	12
Figura 2.11 - Sapata de uma torre de rede elétrica com betão contaminado com sulfatos .....	12
Figura 3.1 - Diagrama de Pourbaix para o sistema água/ferro a 25°C .....	16
Figura 3.2 - Representação esquemática da corrosão das armaduras .....	16
Figura 3.3 - Volume relativo dos produtos da corrosão .....	17
Figura 3.4 - Perfis de concentração de hidróxidos na zona da carbonatação .....	20
Figura 3.5 - Zonas envolvidas no mecanismo de carbonatação e variação do pH ao longo da profundidade .....	21
Figura 3.6 - Influência da concentração de CO <sub>2</sub> no coeficiente de carbonatação .....	22
Figura 3.7 - Grau de carbonatação em função da humidade relativa do ar .....	23
Figura 3.8 - Profundidade de carbonatação em relação à humidade relativa e o teor de CO <sub>2</sub> ....	24
Figura 3.9 - Influência da razão água/cimento na profundidade de carbonatação .....	24
Figura 3.10 - Influência da cura do betão na profundidade de carbonatação .....	26
Figura 3.11 - Influência da resistência à compressão do betão sobre a carbonatação .....	26
Figura 3.12 - Relação entre a resistência à compressão e a profundidade de carbonatação. ....	27
Figura 3.13 - Representação esquemática da carbonatação no interior de uma fissura .....	27
Figura 3.14 - Intensidade de corrosão em diferentes zonas em ambiente marítimo .....	28
Figura 3.15 - Exemplificação de corrosão por picadas - pitting .....	29
Figura 3.16 - Mecanismo e forma de atuação da corrosão das armaduras por picadas .....	29
Figura 3.17 - Mecanismos de transporte dos cloretos numa estrutura de betão armado em ambiente marítimo .....	31
Figura 3.18 - Exemplificação da penetração de cloretos numa estrutura marítima em função de diferentes altitudes (Cimento Portland Normal; razão água-cimento = 0,5; C3A= 10%) .....	32
Figura 3.19 - Representação esquemática das três formas de cloretos no betão .....	33
Figura 3.20 - Variação da concentração do rácio entre iões cloreto e iões hidróxido em função da taxa de corrosão .....	34
Figura 3.21 - Representação de alguns fatores que influenciam o limite crítico de cloretos .....	34
Figura 3.22 - Influência da razão água-cimento na penetração de cloretos .....	36
Figura 3.23 - Influência da compactação na penetração de cloretos .....	36
Figura 3.24 - Influência do período de cura e razão água-cimento na difusibilidade de iões cloreto .....	37
Figura 3.25 - Influência da cura e adições pozolânicas na difusibilidade de cloretos .....	37
Figura 3.26 - Influência da dosagem de cimento na profundidade de penetração de cloretos ....	38

Figura 3.27 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos: em função da razão água-cimento para diferentes tipos de cimento (a); em função do tempo para diferentes tipos de cimento expostos a uma zona de salpicos em ambiente marítimo (b) .....	38
Figura 3.28 - Influência da difusibilidade de cloretos num betão carbonatado.....	40
Figura 4.1 - Meios auxiliares de avaliação in situ .....	42
Figura 4.2 - Representação da classificação de ensaios in situ através do grau de destruição em elementos de betão .....	44
Figura 4.3 - Esclerómetro de Schmidt.....	45
Figura 4.4 - Ábaco de correlação do martelo de Schmidt .....	46
Figura 4.5 - Conjunto de elementos indispensáveis à realização do ensaio de ultrassons .....	47
Figura 4.6 - Representação do procedimento de calibração do aparelho de ultrassons .....	48
Figura 4.7 - Representação dos três métodos de medição de tempo de propagação das ondas ultrassónicas obtidas através do ensaio de ultrassons .....	49
Figura 4.8 - Gráfico de obtenção da velocidade média da onda através do método indireto.....	51
Figura 4.9 - Representação de um ensaio termográfico .....	52
Figura 4.10 - Representação esquemática da barreira devido a presença de ar.....	53
Figura 4.11 - Exemplo de um equipamento de deteção de armaduras – FerroScan PS 200 .....	54
Figura 4.12 - Representação esquemática do ensaio de arrancamento - Lock-Test.....	56
Figura 4.13 - Representação esquemática do ensaio de arrancamento - Capo-Test.....	56
Figura 4.14 - Equipamento para o ensaio Pull-Off .....	58
Figura 4.15 - Exemplo de carote de betão com zonas carbonatadas nas extremidades .....	60
Figura 4.16 - Representação da solução branca pastosa num provete de betão (a) e de um precipitado branco na superfície de betão (b) .....	61
Figura 5.1 - Ligação entre as diferentes partes da norma.....	65
Figura 5.2 - Etapas principais de um processo de reparação de uma estrutura de betão.....	66
Figura 5.3 - Tarefas para avaliação do estado da estrutura .....	67
Figura 5.4 - Opções de intervenção numa estrutura de betão .....	67
Figura 5.5 - Identificação das causas das patologias no betão armado .....	68
Figura 5.6 - Possíveis decisões sobre as medidas a implementar .....	68
Figura 5.7 - Princípios e métodos segundo a NP EN1504 .....	69
Figura 6.1 - Decapagem e remoção de betão de recobrimento com jato de areia a) e com martelo de agulhas b) .....	74
Figura 6.2 - Impregnação com silanos no viaduto Duarte Pacheco em Lisboa.....	75
Figura 6.3 - Pintura com tinta de poliuretano na pala do Pavilhão de Portugal em Lisboa .....	75
Figura 6.4 - Aplicação de telas betuminosas para proteção do betão.....	76
Figura 6.5 - Técnicas de proteção das armaduras contra a corrosão induzida por cloretos em estruturas novas .....	77
Figura 6.6 - Técnicas de proteção das armaduras contra a corrosão induzida por cloretos em estruturas existentes. ....	77
Figura 6.7 - Pastilhas Z para proteção catódica das armaduras.....	78
Figura 6.8 - Fitas de Ti/MMO a), abertura de roços no betão b), instalação das fitas nos roços c), aplicação de argamassa de enchimento nos roços d) .....	78
Figura 6.9 - Representação esquemática das fases de proteção de armaduras contra a corrosão induzida por carbonatação do betão .....	79
Figura 6.10 - Reparação de fendas por injeção de resina de epóxico .....	81
Figura 6.11 - Representação de betonagem com agregados pré-colocados .....	83

Figura 6.12 - Preparação do substrato – martelos pneumáticos para remoção.....	84
Figura 6.13 - Preparação do substrato – jato de água para decapagem e limpeza das armaduras a), Aspeto da superfície após tratamento b) .....	84
Figura 6.14 - Aplicação do betão projetado .....	85
Figura 6.15 - Cura das superfícies reparadas através de um sistema automático de rega .....	85
Figura 6.16 - Reforço de uma viga.....	87
Figura 6.17 - Encamisamento de um pilar .....	88
Figura 6.18 - Reforço de estrutura em betão com chapas de aço coladas .....	90
Figura 6.19 - Utilização de mantas de FRP no reforço estrutural de um viaduto. a) antes da intervenção, b) depois da intervenção .....	92
Figura 6.20 - Reforço estrutural com perfis metálicos .....	92
Figura 6.21 - Reforço e eliminação de deformação de uma viga .....	93
Figura 6.22 - Pré-esforço de uma consola com recurso a desviadores de direção e a um conector. .....	93
Figura 6.23 - Libertação de momentos utilizada como técnica de reforço.....	95
Figura 7.1 - Processo de autorreparação do betão através de microcápsulas .....	98
Figura 7.2 - Aspeto das fibras ocas de vidro .....	98
Figura 7.3 - Foto da junta de reparação criada pela libertação de selante dos tubos totalmente embutidos no betão .....	98
Figura 7.4 - Representação esquemática do sistema de abastecimento externo contendo o agente de reparação .....	99
Figura 7.5 - Pilares de betão após ensaio mecânico semelhante ao que pode ocorrer durante um sismo .....	101
Figura 7.6 - Fotografias em lapsos de tempo (a-d) exibem uma amostra de ECC passando por autorreparação .....	102
Figura 7.7 - Microfissuras no ECC, antes (a) e depois (b) da autorreparação .....	102
Figura 7.8 - Representação esquemática da produção de carbonato de cálcio por bactérias urolíticas .....	104
Figura 8.1 - Localização do edifício em estudo .....	107
Figura 8.2 - Infiltrações na parede do parque de estacionamento .....	109
Figura 8.3 - Infiltrações na zona das escadas .....	109
Figura 8.4 - Manchas de humidade nos muros de suporte .....	110
Figura 8.5 - Eflorescências e criptoflorescências nos pilares no piso -1 .....	111
Figura 8.6 - Eflorescências e criptoflorescências nos pilares do piso -2.....	111
Figura 8.7 - Criptoflorescências nas paredes dos pisos de estacionamento .....	111
Figura 8.8 - Destacamento de betão num pilar do piso -2.....	112
Figura 8.9 - Fissuração nas paredes dos parques de estacionamento .....	113
Figura 8.10 - Fissuração nas escadas de acesso aos escritórios .....	113
Figura 8.11 - Fissuração visível no muro de suporte .....	113
Figura 8.12 - Fissuração generalizada no muro de suporte .....	113



## Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Classes do teor de cloretos do betão .....	35
Tabela 3.2 - Comparação de coeficientes de difusão de cloretos quantificados em regime estacionário entre três misturas cimentícias distintas .....	38
Tabela 4.1 - Fatores de classificação de fissuras ou fendas, adquiridos através da inspeção visual .....	43
Tabela 4.2 - Relação entre a máxima dimensão de agregado do betão a ensaiar e o comprimento de percurso de propagação de onda adotado no ensaio de ultrassons .....	48
Tabela 4.3 - Relação entre a velocidade de impulso e a qualidade do betão .....	51
Tabela 4.4 - Condutibilidade térmica dos materiais .....	52



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento do tema

Considera-se que o betão, tal como o conhecemos hoje em dia, teve início no século XIX, pela mão de Louis Vicat que em 1817 inventou o cimento artificial a partir da cozedura conjunta de argila e calcário. Devido à hidraulicidade e rapidez de endurecimento, esta mistura passou a ser utilizada frequentemente nas construções.

A invenção do betão armado surgiu em meados do século XIX e é atribuída a Joseph-Louis Lambot que em 1848 contruiu um pequeno barco de betão armado que foi exibido na Exposição Universal de Paris em 1855. A expansão do betão armado surge a partir de 1890 através do construtor François Hennebique e aos estudos experimentais e teóricos de Considère, Rabut e Mesnager que estabeleceram as leis fundamentais da resistência do betão armado (Brito et al., 2002).

A primeira construção portuguesa em que se aplicou esta tecnologia foi a moagem de António José Gomes no Caramujo, Cova da Piedade e foi concluída em 1898. Seguidamente surgiram outras obras de betão armado, das quais se destacam a ponte sobre a ribeira de vale de Meões em Mirandela (atualmente destruída) e a barragem de Xarrama em Évora, entre outras. Mais tarde surgiram obras mais grandiosas como o Instituto Superior Técnico em 1936, ou a Igreja de Nossa Senhora de Fátima, concluída em 1938, nas Avenidas Novas, ambas em Lisboa (Brito et al., 2002).

Nas últimas décadas o betão armado tem sido o material estrutural dominante na esmagadora maioria das obras de construção civil, quer em Portugal, quer no mundo inteiro. O seu campo de aplicação vai desde os edifícios correntes até aos arranha-céus, edifícios públicos e industriais, infraestruturas viárias como as pontes e infraestruturas hidráulicas como as barragens.

Ao longo dos anos foram surgindo novos produtos e conceitos associados ao betão procurando novas aplicações e melhorias, tais como o betão leve, o betão de elevado desempenho, betão ciclópico ou os betões coloridos.

A elevada utilização do betão armado nas construções deriva de algumas vantagens que lhe estão associadas. Desde logo a disponibilidade de matéria-prima em grande quantidade, a economia em relação a outros materiais, o facto de ser um material de fácil adaptabilidade em termos geométricos e de não precisar de mão-de-obra muito especializada e ainda apresenta uma boa resistência às ações mecânicas, para além de ser um material incombustível.

No campo das desvantagens, o betão apresenta um elevado peso próprio e um baixo isolamento térmico. De salientar também o significativo impacte ambiental devido à exploração

de pedreiras, assim como a produções de resíduos durante a construção e sobretudo devido a demolições.

A durabilidade do betão não foi objeto de atenção nos primeiros regulamentos nacionais, surgindo apenas no Regulamento das Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado (REBAP), de 1983, do qual fazia parte o Regulamento de Betões de Ligantes Hidráulicos (RBLH), de 1971, mais tarde substituído pela NP EN 206, de 1993. Esta norma considera 5 classes de exposição ambientais (ambiente seco, ambiente húmido, ambiente húmido com gelo e produtos descongelantes, ambiente marítimo e ambiente quimicamente agressivo).

Mais tarde a durabilidade ganhou a devida importância ao passar a estar presente nos novos regulamento de vários países incluindo os da União Europeia tornando-se um critério de dimensionamento de estruturas de betão armado. A NP EN 1992-1-1 preconiza que uma estrutura duradoura deverá satisfazer, durante o seu tempo de vida, os requisitos de utilização, resistência e estabilidade devendo ser consideradas as ações sobre a estrutura, as deformações e as condições ambientais.

O betão armado é um material que apresenta alguma sensibilidade e que se degrada ao longo do tempo. Deste modo é normal esperar que as construções sofram um envelhecimento natural quer devido à utilização normal quer devido ao meio ambiente. A velocidade de envelhecimento do betão armado depende de vários fatores, alguns deles que podem ser evitados durante a vida da construção. Hoje em dia há um conhecimento mais profundo acerca dos fatores que aumentam a durabilidade do betão tais como a razão água-cimento, a boa compactação e cura do betão ou ainda o adequado recobrimento das armaduras (Brito, 2004).

A corrosão das armaduras é a principal causa de deterioração das estruturas de betão armado devido ao mecanismo de carbonatação e à penetração de cloretos. Devido à sua elevada alcalinidade, o betão jovem protege as armaduras através de uma camada de passivação à superfície do aço. No entanto, esta camada está sujeita a destruição devido a agentes agressivos que penetram no betão e destruindo a camada de passivação, desencadeiam o fenómeno da corrosão. O dióxido de carbono e os iões cloreto são os principais agentes de destruição da camada de passivação das armaduras. O primeiro provoca o decréscimo da alcalinidade do betão dando origem à carbonatação do mesmo. Por outro lado, os iões cloreto, quando excedem um determinado limite crítico, embora não interfiram no teor de pH do betão, promovem um ataque localizado originando uma rotura pontual da película passivante (Andrade, 1992).

Os efeitos da corrosão refletem-se na redução da secção dos varões, criando elevadas tensões internas que provocam a redução da aderência entre as armaduras e o betão, fendilhação

e destacamento do betão de recobrimento, colocando em risco a capacidade resistente da estrutura de betão armado (Andrade, 1992).

A reabilitação é hoje em dia um tema em expansão no nosso país devido ao estado de conservação de grande parte do edificado e ao decréscimo de construções novas. Assim, torna-se importante conhecer os mecanismos de deterioração do betão armado, as patologias que se podem encontrar nas estruturas, os ensaios existentes que são fundamentais para uma correta avaliação das anomalias, a normalização que serve de apoio às técnicas que visam proteger, reabilitar ou reforçar as estruturas de betão armado. Desta forma, este Trabalho Final de Mestrado baseia-se num tema com elevado potencial de crescimento no sector da construção civil, face ao panorama atual do edificado português.

## 1.2. Objetivo

A presente dissertação aborda diversos assuntos relacionados com o betão armado tendo como objetivo aprofundar o conhecimento das causas e consequências das patologias mais comuns e os métodos de proteção e reabilitação das estruturas.

Assim, este trabalho final de mestrado tem como objetivo, o desenvolvimento das seguintes atividades:

- Efetuar um levantamento das principais patologias existentes nas estruturas de betão armado na fase de construção, patologias estruturais ou de durabilidade;
- Analisar o processo de deterioração das estruturas de betão armado por corrosão das armaduras devido ao fenómeno da carbonatação e do ataque dos cloretos;
- Caracterizar os métodos de inspeção e ensaio *in situ* mais utilizados na deteção das patologias das estruturas de betão armado;
- Efetuar o enquadramento e aplicabilidade da norma NP EN 1504, pormenorizando a estrutura da norma, as fases previstas e preconizadas para a reparação de uma estrutura de betão armado e os princípios e métodos de proteção, reparação e reforço contidos na norma;
- Apresentar algumas técnicas de proteção, reparação e reforço de estruturas de betão armado;
- Abordar o tema do betão autorreparável que suscita um interesse cada vez maior na comunidade científica e nos agentes envolvidos na construção civil;
- Aplicar alguns dos temas referidos anteriormente a um caso prático, elaborando fichas de inspeção e diagnóstico e fichas de reparação para sugerir métodos de reparação e produtos de acordo com os requisitos da norma.

### **1.3. Estrutura da Dissertação**

A presente dissertação encontra-se organizada em nove capítulos. No primeiro capítulo faz-se uma introdução, constando o enquadramento do tema, o objetivo e uma descrição sumária dos conteúdos dos restantes capítulos.

No segundo capítulo efetua-se o levantamento das principais patologias que ocorrem no betão armado.

O terceiro capítulo continua a explorar as patologias do betão armado com ênfase para a corrosão das armaduras devido à carbonatação e aos iões cloreto.

O quarto capítulo pretende caracterizar os principais métodos de inspeção e ensaio realizados *in situ* com o objetivo de identificar as patologias enumeradas nos dois capítulos anteriores.

O quinto capítulo faz o enquadramento da norma NP EN 1504 ao tema desta dissertação e desenvolve a sua aplicabilidade, explorando a sua estrutura, as fases de reparação, os princípios e métodos de reparação das estruturas de betão armado.

O sexto capítulo serve de apresentação e desenvolvimento das técnicas de proteção, reparação e reforço das estruturas de betão armado.

No sétimo capítulo são abordados alguns dos métodos de autorreparação do betão que estão a ser investigados e desenvolvidos atualmente.

O oitavo capítulo faz-se uma aplicação prática de alguns dos temas abordados neste trabalho, com a elaboração fichas de inspeção e diagnóstico e fichas de reparação para sugerir métodos de reparação e produtos de acordo com os requisitos da norma.

No nono capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho.

## 2. PATOLOGIAS DO BETÃO ARMADO

### 2.1. Introdução

As anomalias ou patologias do betão armado podem surgir devido a uma grande variedade de fenómenos de degradação, sendo que as causas principais dessas anomalias no betão podem ser diferenciadas pelo tempo de ocorrência. As patologias do betão podem ocorrer antes do início da construção, isto é, na fase de projeto, durante a fase de construção através de erros de execução, no decurso da utilização normal da construção devido a ações biomecânicas ou à ação do meio ambiente e também se podem verificar patologias no betão em consequência de catástrofes naturais imprevisíveis ou até quando uma estrutura de betão armado sofre uma alteração das condições de serviço (Brito et al., 2002; Farinha, 2010). De uma forma geral pode-se dividir as patologias em três grandes grupos: patologias decorrentes do processo de construção, patologias estruturais e patologias de durabilidade (Brito et al., 2002).

### 2.2. Patologias na fase de construção

Durante a fase de construção podem surgir patologias no betão armado devido a diversas variáveis que podem afetar o processo de fabrico e preparação do betão e a forma como é colocado e moldado em obra, o que pode potenciar a ocorrência de enganos e defeitos na construção.

#### 2.2.1. Erros de geometria

Durante a fase de construção é necessário fazer um controlo de qualidade da mesma de forma a evitar os chamados erros de geometria que podem surgir quando alguns elementos de uma estrutura não respeitam o projeto e não seguem a geometria e dimensionamento exato das peças. Outra das causas desta patologia é o posicionamento incorreto da cofragem. Quando se verificam estas anomalias podem resultar elementos estruturais como por exemplo pilares, vigas ou paredes com inclinações ou excentricidades entre elementos da estrutura (Brito et al., 2002). A Figura 2.1 representa um dos erros de geometria possíveis de verificar nas construções.

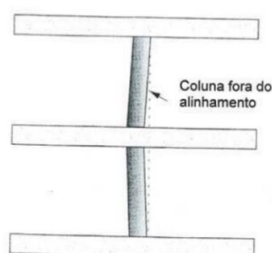


Figura 2.1 - Erros de geometria entre pilares (Brito et al., 2002).

#### 2.2.2. Segregação do betão, vazios e zonas porosas

A incorreta preparação do betão, o excesso de vibração e a betonagem de alturas excessivas podem levar a outra patologia que é a segregação do betão, isto é, uma distribuição não uniforme dos seus constituintes verificando-se finos em excesso à superfície, bem como

elevadas percentagens de água ou de cimento. Esta patologia também pode ocorrer quando o espaçamento das armaduras é muito pequeno e não permite a passagem dos agregados maiores durante a betonagem nem uma correta vibração do betão (Brito et al., 2002; Brito, 2004).

Uma das patologias também observáveis na fase da construção são os vazios e zonas porosas que são detetadas a olho nú e que ocorrem junto às superfícies exteriores de uma estrutura de betão armado mas também podem ocorrer no interior. As principais causas desta anomalia podem ser a granulometria mal escolhida dos agregados em que podem estar ausentes os mais finos, a segregação dos agregados, uma baixa razão água-cimento, a deficiente vibração e por consequência uma má compactação do betão ou ainda uma cofragem mal executada, mal escorada ou de rigidez insuficiente (Brito et al., 2002; Brito, 2004). Na Figura 2.2 pode-se observar a existência de vazios (chochos) num elemento de betão armado.



Figura 2.2 - Vazios no betão (Brito et al., 2002).

### 2.2.3. Descontinuidades visíveis no betão

As descontinuidades visíveis no betão, comumente chamadas de juntas de betonagem, são pontos de descontinuidade muito frequentes, onde o betão não tem uma ligação forte e uniforme. Acontecem quando um betão novo é colocado sobre um betão com mais idade ou em fase de presa. Dessa forma, o novo betão não adere correta e completamente ao betão inicial ou adulto ficando entre eles uma separação visível, tal como é observável na Figura 2.3.



Figura 2.3 - Descontinuidades visíveis numa estrutura de betão (adaptado de Brito et al., 2002).

Inevitavelmente esta patologia surge em quase todas as construções, no entanto é necessário tentar evitar ao máximo a ocorrência desta anomalia não descurando o controlo de qualidade durante a execução da construção (Brito et al., 2002; Brito, 2004).

### 2.2.4. Manchas no betão

Durante o processo de construção podem surgir manchas à superfície do betão que podem ser manchas de humidade, coloridas ou eflorescências. As manchas de humidade no betão

ocorrem por perda de humidade através da cofragem. As manchas coloridas devem-se a variações de cor à superfície do betão originando agregados aparentes, efeito de salpicado ou negrões. Estes últimos podem surgir quando os óxidos metálicos contidos nos agregados que se encontram próximo da superfície hidratam e oxidam originando uma coloração avermelhada. Nos casos em que se utiliza o cloreto de cálcio como acelerador de presa também podem ocorrer nódulos à superfície, causando manchas (Brito et al., 2002; Brito, 2004).

As eflorescências ou manchas brancas são depósitos de sais cristalizados que aparecem à superfície do betão endurecido e têm origem na circulação de água através do próprio betão. Desenvolvem-se sobretudo devido a sais solúveis e matéria orgânica existente nos agregados ou na água de amassadura (Brito et al., 2002; Brito, 2004). A Figura 2.4 retrata a existência de manchas de humidade e eflorescências num elemento de betão.



Figura 2.4 - Manchas de eflorescências visíveis no betão (adaptado de Brito et al., 2002).

Outra das causas na origem das manchas visíveis à superfície do betão pode ser a contaminação promovida pela oxidação das armaduras durante o processo de construção, quer devido à deficiente colocação das armaduras que ficam em contacto com a cofragem, quer devido à oxidação das armaduras presentes em estruturas que ainda não foram betonadas (Brito et al., 2002; Brito, 2004).

### **2.2.5. Fissuração**

A fissuração é uma patologia que pode dar-se durante o processo de construção. A ocorrência da fissuração deve-se a causas como a colocação incorreta das armaduras e cabos de pré-esforço, devido a uma cura deficiente do betão, ao assentamento plástico do betão ou à remoção prematura das cofragens (Brito et al., 2002; Brito, 2004).

No caso da colocação incorreta das armaduras pode ocorrer um deficiente recobrimento das mesmas, o que facilita a fissuração do betão e aumenta a possibilidade de corrosão das armaduras. O deslocamento das armaduras durante a fase de presa do betão também pode provocar igualmente fissuras. Já no caso dos cabos de pré-esforço, a sua colocação e excentricidade têm de estar de acordo com o projeto, ou a capacidade resistente será afetada e reduzida podendo provocar fissuração e em casos extremos o colapso da estrutura (Brito et al., 2002; Brito, 2004).

Uma cura deficiente do betão pode levar à fissuração por retração do betão, já que a água existente no betão não compensa as perdas devido à evaporação natural durante a secagem. O betão fresco passa por um processo de aumento de temperatura devido ao calor gerado pela

hidratação do cimento durante as primeiras horas ou dias dependendo das condições atmosféricas depois da betonagem, arrefecendo de seguida até à temperatura ambiente. O calor de hidratação associado a baixa resistência do betão pode levar a fissuras que podem ser mais severas se não existirem juntas de dilatação em casos de peças de grandes dimensões (Brito et al., 2002; Brito, 2004).

A migração da água do betão para a superfície exterior antes de atingir a presa pode originar fissuras causadas pelo assentamento plástico do betão. Durante esse processo, a diminuição do volume de betão provoca assentamento que, quando impedido localmente pela armadura ou pela cofragem, causa fissuração. A fissuração do betão durante a fase de construção pode ainda surgir devido à remoção da estrutura de suporte da cofragem e/ou da própria cofragem antes do betão adquirir a resistência necessária e suficiente (Brito et al., 2002; Brito, 2004).

### **2.3. Patologias Estruturais**

As patologias do betão consideradas como estruturais traduzem-se geralmente pelo aparecimento de fissuras de tamanho significativo ou por deformações severas da estrutura. Excetuando os casos em que a estrutura sofre um carregamento excessivo, a fissuração significativa, na maioria dos casos, surge após processos de deformação nos quais o movimento da peça está restringido. As ligações laje-pilar-viga constituem, por norma, pontos particularmente sensíveis ao aparecimento de fissuras (Brito et al., 2002; Brito, 2004).

#### **2.3.1. Fissuração devida às ações das cargas de cálculo**

Existem diversas ações sobre a estrutura que podem provocar fendilhação no betão. As cargas de cálculo são uma das ações que causam a fendilhação no betão de forma ligeira e não preocupante, embora existam limites que devem ser tidos em conta. No entanto, se as cargas forem excessivas podem dar origem a níveis de fendilhação inaceitáveis. Existem três razões fundamentais da limitação da fendilhação: aspeto estético do elemento estrutural, proteção contra a corrosão e a garantia de estanqueidade. As fendas podem ser classificadas segundo a sua largura máxima. Assim sendo, existem as microfissuras (até 0,05 mm), as fissuras médias (entre 0,05 mm e 0,4 mm) e as microfissuras (mais de 0,4 mm) (Brito et al., 2002; Brito, 2004).

Na Figura 2.5 podem-se observar fissuras resultantes das ações das cargas de cálculo.



Figura 2.5 - Aspeto genérico de fissuras devida a cargas de cálculo (adaptado de Brito et al., 2002).

### 2.3.2. Fissuração devida a tração ou compressão simples

Quando um elemento estrutural de betão está sujeito a tração pura sofre fissuras perpendiculares à direção do esforço, apresentando fissuras com afastamento uniforme e atravessando o elemento em toda a sua largura (Brito et al., 2002; Brito, 2004).

No caso de o betão ser comprimido as fissuras geradas por compressão simples são irregulares e paralelas à direção do esforço. Ao ser comprimido, o betão tem extensões negativas na direção do carregamento e extensões positivas na direção perpendicular. Esta situação é tipicamente verificada em pilares devido ao carregamento vertical (Brito et al., 2002; Brito, 2004). A Figura 2.6 apresenta o esquema de rotura de um elemento de betão à tração (A) e à compressão (B).

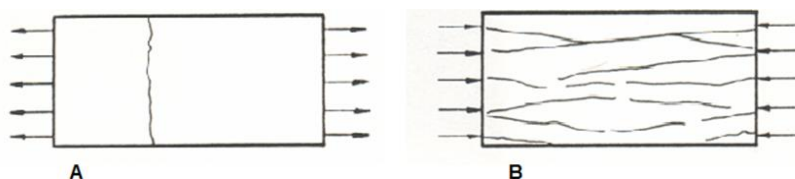


Figura 2.6 - Esquema de rotura por tração simples (A) e por compressão simples (B) (adaptado de Brito et al., 2002).

### 2.3.3. Fissuração devida a flexão simples, esforço transversal ou torção

Um elemento de betão armado simplesmente apoiado e sujeito a um carregamento uniforme pode apresentar fissuração, em princípio, nos pontos de tensão mais elevada, que se podem verificar a meio vão ou nos apoios. Esta fissuração ocorre geralmente após se atingirem flechas excessivas em vigas ou em lajes (Brito et al., 2002; Brito, 2004).

As fissuras geradas por flexão podem ocorrer sem esforço transversal ou com esforço transversal. No primeiro caso, as fissuras apresentam-se perpendiculares em relação ao eixo da peça não atravessando completamente a secção e vão aumentando a partir da fibra neutra para a fibra mais tracionada. No segundo caso, como se pode observar na Figura 2.7, tendem a inclinar na direção dos apoios aumentando a inclinação à medida que se aproximam do apoio (Brito et al., 2002; Brito, 2004).

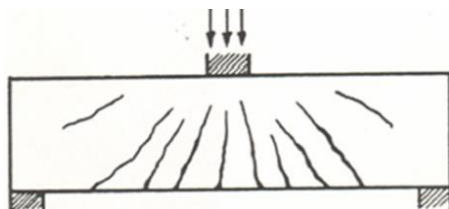


Figura 2.7 - Esquema de rotura por flexão simples com esforço transversal (adaptado de Brito et al., 2002).

As fissuras geradas por esforço transversal começam no ponto de aplicação do esforço e desenvolvem-se em direção aos apoios. Quando existe fissuração devido ao elemento estrutural de betão estar sujeito a torção, as fissuras apresentam-se inclinadas aproximadamente a 45° nas diversas faces da peça e normalmente em conjunto formam uma linha helicoidal quebrada, tal como ilustrado na Figura 2.8 (Brito et al., 2002; Brito, 2004).

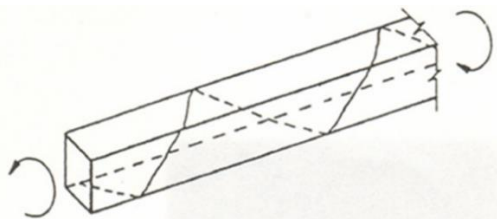


Figura 2.8 - Esquema de rotura de um elemento de betão por torsão (adaptado de Brito et al., 2002).

#### 2.3.4. Fissuração devido a ações termo-higrométricas

O efeito da temperatura nas estruturas de betão reflete-se na variação de volume que as mesmas apresentam, provocando fissuras que apresentam habitualmente um espaçamento uniforme atravessando a estrutura. No caso de estruturas em que existem juntas de dilatação, a oscilação das mesmas demonstra que a estrutura se encontra sob ação da temperatura (Brito et al., 2002; Brito, 2004).

As estruturas são afetadas de modo diferente pelas variações térmicas uniformes consoante a sua geometria e o seu grau de estatia mas no caso de se verificarem variações de gradientes térmicos em que existem distribuições de temperaturas diferenciais numa estrutura, podem provocar grandes tensões no interior da estrutura gerando fissuras. É uma situação muito comum em estruturas em que uma face está exposta a altas temperaturas enquanto que a face oposta se encontra protegida (Brito et al., 2002; Brito, 2004).

#### 2.3.5. Fissuração devida aos assentamentos diferenciais de apoios

O assentamento do terreno de fundação induz um deslocamento relativo dos apoios introduzindo fissuras devido a alterações impostas à estrutura. Por norma, essas fissuras são inclinadas a 45° nas paredes perpendiculares ao deslocamento das fundações e quanto mais rígida for a estrutura mais severas serão as fissuras (Brito et al., 2002; Brito, 2004). Um exemplo deste tipo de fissuração pode-se observar na Figura 2.9.



Figura 2.9 - Fissuração devida a assentamentos diferenciais de apoios (adaptado de Brito et al., 2002).

#### 2.3.6. Fissuração devida às ações resultantes de acidentes

As causas mais comuns de fissurações resultantes de acidentes são a ação sísmica, os incêndios, choques, explosões, inundações, movimentações de terras, cargas excessivas ou ventos excepcionais (Brito et al., 2002; Brito, 2004). A ação dos sismos é aquela que causa geralmente anomalias graves nas estruturas, chegando muitas vezes a ultrapassar as fissuras atingindo grandes

deformações e até o colapso total. As fissuras produzidas pelos sismos são de tipo irregular e inclinadas, atravessando as paredes e aparecendo em vários sentidos. No caso dos pilares de uma estrutura atingida por um sismo as fissuras são de flexão e também se apresentam em vários sentidos (Brito et al., 2002; Brito, 2004).

No caso do fogo, devido a um aumento de temperatura, provocando gradientes de temperatura extremos, as fissuras são geradas pelas fortes variações de volume do betão que compõe a estrutura. Em casos extremos, a expansão rápida do betão perto da origem do fogo pode provocar a delaminação do betão (Brito et al., 2002; Brito, 2004).

## **2.4. Patologias de Durabilidade**

As patologias ou anomalias de durabilidade estão relacionadas com a degradação das construções ao longo do seu tempo de vida. Estas patologias podem ser mais ou menos nefastas, sendo as mais comuns a coloração do betão, a exposição e corrosão das armaduras, a fissuração do betão, e a desagregação e descasque do betão. As patologias associadas à corrosão das armaduras são as que causam maiores danos nas estruturas de betão armado e devem-se, principalmente, ao ataque dos cloretos ou à carbonatação. As restantes patologias de durabilidade estão associadas às ações climatéricas e à agressividade do meio ambiente (Brito et al., 2002; Brito, 2004; Farinha, 2010).

### **2.4.1. Coloração do betão**

A coloração superficial do betão pode dar indicações sobre as propriedades do betão ou indicar a possível contaminação do betão por ataque de ácidos, sulfatos, álcalis, eflorescências, corrosão das armaduras, entre outros. Destas causas referidas, as que podem causar problemas maiores a uma estrutura é a corrosão das armaduras, que acontece geralmente quando uma estrutura de betão armado sofre um ataque de cloretos e/ou devido à carbonatação (Brito et al., 2002; Brito, 2004; Farinha, 2010).

### **2.4.2. Fissuração e desagregação do betão por ciclo gelo/degelo**

Quando a água acede a uma estrutura por capilaridade pode preencher as microfissuras existentes no betão geradas pelas tensões interiores, e no caso de a água congelar, aumenta de volume gerando tensões internas que provocam fissuração em betões de baixa resistência e em muitos casos podem também provocar a delaminação do betão. Esta situação também se pode verificar no caso de superfícies horizontais expostas a água ou em superfícies verticais que estejam em contacto permanente ou quase permanente com a água (Brito et al., 2002; Brito, 2004).

### **2.4.3. Fissuração e desagregação do betão pelas reações álcalis-sílica**

As reações álcalis-sílica são geradas devido à presença de sílica reativa nos agregados utilizados no fabrico do betão que reage com o potássio, sódio e hidróxido de cálcio do cimento

formando um gel à volta dos agregados na presença de humidade aumentando o volume dos mesmos, provocando tensões no betão que irão gerar fissuração à volta dos agregados. Esta reação pode ser impercetível durante bastante tempo e revelar-se subitamente num estado já avançado tal como se pode visualizar na Figura 2.10 (Brito et al., 2002; Brito, 2004).



Figura 2.10 - Fissuração devido a reação álcalis-silica (Thomas et al., 2011).

#### 2.4.4. Fissuração e desagregação do betão geradas pelo ataque de sulfatos ou ácidos

Este tipo de ataque ao betão dá-se em solos, águas e processos industriais contaminados com sulfatos de sódio, cálcio ou magnésio, sendo estes últimos os menos comuns mas os mais destrutivos. As águas e os solos que contenham estes sulfatos são geralmente denominados de alcalinos (Brito et al., 2002; Brito, 2004). Na Figura 2.11 pode-se observar o desenvolvimento de fissuração numa sapata de betão contaminado com sulfatos.



Figura 2.11 - Sapata de uma torre de rede elétrica com betão contaminado com sulfatos (adaptado de Brito et al., 2002).

Os sulfatos atacam a matriz cimentícia e transformam-na numa espécie de gesso e etringite que provocam uma reação expansiva fazendo perder a aderência entre o cimento e os agregados resultando em fissuração do betão e podendo ter como consequência mais grave a completa desagregação do betão (Brito et al., 2002; Brito, 2004).

O ataque do betão através de ácidos ocorre sobretudo em unidades industriais e consiste na reação entre o ácido e o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do betão. Tal como os sulfatos, os ácidos atacam também a matriz cimentícia do betão libertando os agregados. Os ácidos podem ser divididos em cinco categorias: ácidos inorgânicos, ácidos orgânicos, soluções alcalinas, soluções salinas e mistos (Brito et al., 2002; Brito, 2004).

#### **2.4.5. Desagregação do betão por erosão**

A desagregação do betão por erosão consiste numa ação mecânica violenta e pode ocorrer devido à ação da água ou do vento. A erosão devida à ação da água chama-se de erosão por cavitação e consiste na erosão do betão por colapso das bolhas de vapor que são geradas na água devido à diferença de pressão, em locais onde a água corre a uma velocidade elevada ou cai com grande impacto, como por exemplo, zonas de descarga de barragens ou cais marítimos (Brito et al., 2002; Brito, 2004). A erosão por ação do vento ou erosão por abrasão como é conhecida, consiste no desgaste da matriz cimentícia e agregados por fricção. Este tipo de erosão afeta a resistência à compressão do betão, as propriedades dos agregados e as superfícies de acabamento (Brito et al., 2002; Brito, 2004).



### 3. CORROSÃO DAS ARMADURAS NO BETÃO ARMADO

A corrosão das armaduras dos elementos de betão armado é o principal processo responsável pela deterioração do betão armado e conseqüentemente pela redução da vida útil das estruturas (Brito, 2002; Monteiro, 2010). A corrosão das armaduras é detetável inicialmente através do aparecimento de manchas castanhas ou avermelhadas no betão, a chamada ferrugem. A acompanhar estas manchas pode surgir fissuração, descasque ou desagregação do betão (Monteiro, 2010).

A corrosão é assumida geralmente como a alteração de materiais metálicos através de reações químicas em resultado da interação entre o meio ambiente e os metais que se encontram na natureza sob a forma de compostos (óxidos e sulfetos) associados a outros elementos. Para usar os metais na sua forma elementar é necessário aplicar uma certa quantidade de energia num processo de redução para extrair o metal. No processo inverso, para que o metal volte ao seu estado inicial e natural, é necessário proceder a uma redução de energia através de uma reação espontânea. Este processo que corresponde a uma oxidação é conhecido por corrosão e representa a destruição lenta do metal (Andrade & Alonso, 1996; Monteiro, 2010). A corrosão pode ser classificada como corrosão química quando ocorre oxidação ou corrosão seca ou corrosão eletroquímica no caso de se verificar a corrosão propriamente dita (Monteiro, 2010).

A oxidação dá-se através de um ataque promovido por uma reação gás-metal em que se forma uma película de óxidos, ocorrendo de uma forma extremamente lenta e à temperatura ambiente, não provocando deterioração substancial das superfícies metálicas, exceto nos casos em que é provocada por gases bastante agressivos (Monteiro, 2010).

Por outro lado, a corrosão eletroquímica é formada através de um ataque de natureza eletroquímica em meio aquoso em que existe a formação de uma pilha ou célula de corrosão. Este tipo de corrosão é a principal responsável pela corrosão das armaduras do betão armado (Monteiro, 2010).

O betão é um material naturalmente alcalino devido á presença de elevadas quantidades de hidróxido de cálcio, o que confere uma proteção à corrosão às armaduras. A elevada alcalinidade do betão ( $\text{pH} \pm 13$ ) favorece a formação de uma camada passivante submicroscópica que adere à superfície das armaduras (Monteiro, 2010). Caso o betão mantenha as características físicas e químicas inalteradas, esta camada passivante mantém o aço protegido da corrosão.

A carbonatação implica a diminuição do pH do betão levando a que a camada de passivação seja destruída e as armaduras entrem em processo de corrosão. No caso dos metais é possível estudar a relação entre o potencial de corrosão (E) e o pH (Monteiro, 2010). A Figura 3.1 constitui o diagrama de Pourbaix (1976) ou diagrama E-pH que representa um estudo às reações possíveis de um metal num dado meio acabando por se enquadrar em três estados distintos: imunidade, corrosão e passivação (Monteiro, 2010).

Quando o metal se encontra no estado de imunidade está em condições correspondentes à sua estabilidade termodinâmica, não estando sujeito a sofrer qualquer tipo de corrosão (Monteiro, 2010). No estado de passivação o metal encontra-se coberto por uma camada de óxidos que atua como uma barreira protetora que impede a oxidação do mesmo. Quando são estabelecidas condições termodinâmicas entre o pH e o potencial eletroquímico, a camada passivante entra em instabilidade levando o metal a entrar no estado de corrosão.

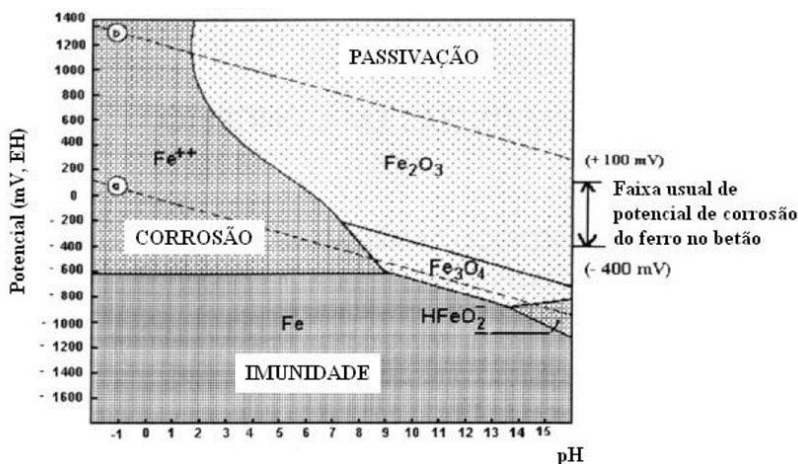


Figura 3.1 - Diagrama de Pourbaix para o sistema água/ferro a 25°C (Monteiro, 2010).

### 3.1. O fenómeno da corrosão

O processo da corrosão assemelha-se ao funcionamento de uma pilha induzido por diferenças de potencial entre as várias zonas da armadura, onde se verifica a existência de um ânodo onde ocorre a oxidação eletroquímica, um cátodo onde ocorre uma redução eletroquímica e um eletrólito por onde circula a corrente iónica, como se pode verificar na Figura 3.2 (Monteiro, 2010).

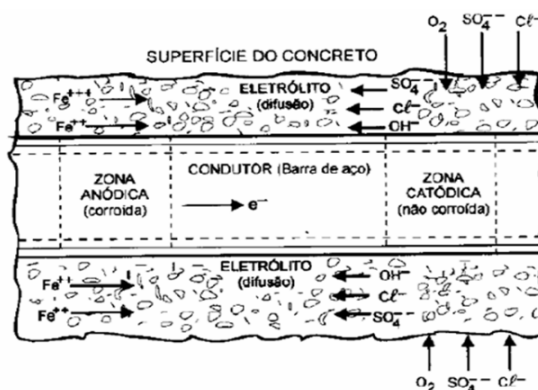


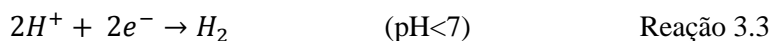
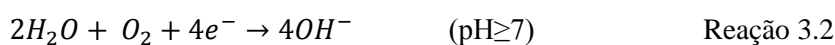
Figura 3.2 - Representação esquemática da corrosão das armaduras (Costa, 1999).

O ânodo consiste na zona de armadura despassivada e o cátodo na zona de armadura que tem acesso ao oxigénio (Helene, 2001; Monteiro 2010). O ânodo, o cátodo e o eletrólito formam entre si um circuito fechado onde irá ocorrer corrosão, dependendo da diferença de potencial que pode ser acentuado aquando da presença de agentes agressivos no eletrólito tais como o CO<sub>2</sub>, facilitando a dissolução da camada de passivação (Helene, 2001; Monteiro 2010). Nas zonas que

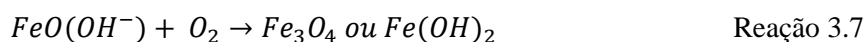
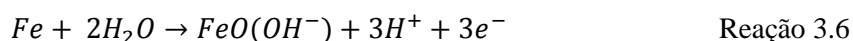
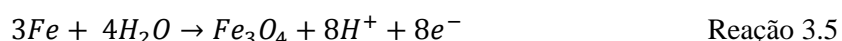
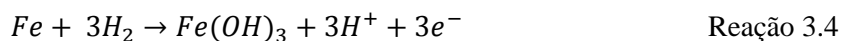
funcionam como ânodo, ou seja as zonas corroídas, ocorre a dissolução do ferro a partir da sua superfície, em que os íões passam para a solução na forma de  $Fe^{++}$  libertando dois eletrões que passam através da armadura que funciona como condutor elétrico até ao cátodo – Reação 3.1 (Helene, 2001; Monteiro 2010).



Nas zonas que funcionam como cátodo, isto é, nas zonas não corroídas, ocorre uma redução de oxigénio na interface betão-armadura e depende da disponibilidade de oxigénio dissolvido e do pH na interface dos dois materiais (Helene, 2001; Monteiro 2010). Os eletrões anteriormente libertados reagem com o oxigénio e com a água, originando íões de hidróxido ( $OH^{-}$ ) que fluem em direção ao ânodo de forma a completar o circuito elétrico – Reações 3.2 e 3.3 (Helene, 2001; Monteiro 2010).



O oxigénio é um fator essencial no fenómeno de corrosão, mas também o principal responsável pela velocidade do processo. A reação anódica referida anteriormente (Reação 3.1), constituiu apenas o primeiro passo no mecanismo da deterioração por corrosão das armaduras. Se este processo fosse limitado apenas à dissolução do aço, não ocorreria a fendilhação e delaminação do betão de recobrimento, dado que os íões de ferro se dissolveriam na solução dos poros. Porém, na zona anódica ocorrem reações secundárias que originam produtos de corrosão cuja forma final depende das condições de humidade e da disponibilidade de oxigénio – Reações 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7 (Helene, 2001; Monteiro 2010).



A ocorrência de fendas no betão permite o rápido acesso das substâncias agressivas ao nível das armaduras, originando células de corrosão. Os produtos de corrosão formados durante o processo descrito anteriormente aumentam significativamente de volume, como se pode verificar na Figura 3.3, gerando dentro do betão tensões internas que levam à sua fendilhação, delaminação e destacamento (Costa, 1999; Helene, 2001; Monteiro 2010).

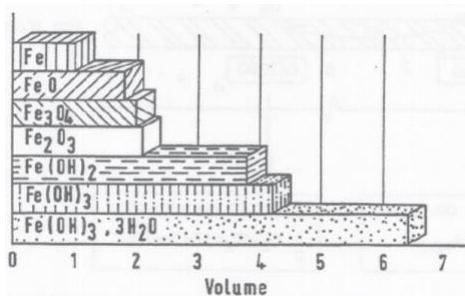


Figura 3.3 - Volume relativo dos produtos da corrosão (Costa, 1999).

A corrosão pode ser classificada segundo a sua morfologia: corrosão generalizada, localizada e fissurante (Costa, 1999; Helene, 2001; Monteiro 2010).

A corrosão generalizada ocorre devido a uma perda generalizada da película de passivação, resultante da frente de carbonatação no betão, presença excessiva de cloretos ou lixiviação do  $\text{Ca(OH)}_2$ . Este tipo de corrosão pode ocorrer de forma uniforme ou de forma não uniforme, sendo que no primeiro tipo a superfície tende a ser lisa e regular e no segundo tipo, rugosa e irregular. Neste segundo tipo de corrosão pode ocorrer perda de características mecânicas do aço, embora a consequência mais grave seja a fissuração do betão (Costa, 1999; Helene, 2001; Monteiro 2010).

A corrosão localizada forma-se devido à dissolução localizada da película passivante normalmente causada pela penetração de iões cloretos vindo do exterior ou pertencentes a algum constituinte do betão. Neste tipo de corrosão forma-se pontualmente uma célula de corrosão onde existe uma área passivada intacta que funciona como cátodo e uma outra área de menores dimensões que funciona como ânodo onde a película passivante foi destruída em que o oxigénio se reduz acabando por dissolver o aço (Costa, 1999; Helene, 2001; Monteiro 2010).

Por fim, a corrosão fissurante ou sob tensão caracteriza-se por ocorrer, em aços submetidos a elevadas tensões, em cuja superfície é gerada uma microfissura que vai progredindo rapidamente, provocando uma rutura frágil do aço, ainda que não existam evidências de ataques. Este tipo de corrosão ocorre normalmente em estruturas pré-esforçadas, não obstante de poder ocorrer também em estruturas de betão armado. Trata-se de um fenómeno específico, geralmente associado à má qualidade do betão, bainhas mal preenchidas, lixiviação do betão ou a presença de determinados iões. As estruturas de betão apresentam-se normalmente sem sinais visíveis de corrosão e as roturas ocorrem de forma brusca (Costa, 1999; Helene, 2001; Monteiro 2010).

## **3.2. Fatores que induzem a corrosão nos elementos de betão armado**

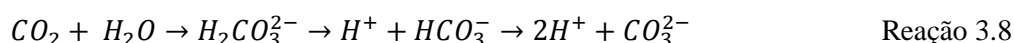
### **3.2.1. Corrosão induzida pela carbonatação**

A carbonatação é uma reação físico-química entre o dióxido de carbono disponível no meio ambiente e a água. No caso da carbonatação do betão, a reação dá-se entre os constituintes ácidos do meio e o líquido intersticial existente nos poros do betão armado. Os principais constituintes do meio são o ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e o ácido sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) (Simas, 2007).

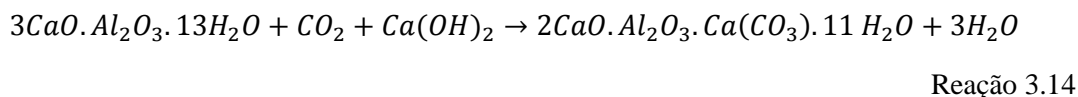
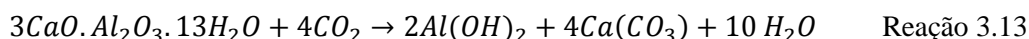
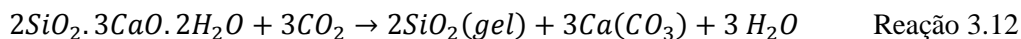
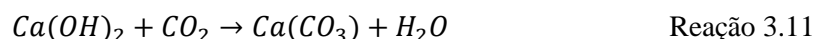
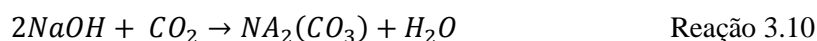
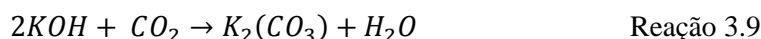
A velocidade da carbonatação está relacionada com a pasta cimentícia, com os iões carbonatos mas também com a capacidade de penetração e reação do  $\text{CO}_2$ . O transporte do  $\text{CO}_2$  do meio envolvente até às armaduras é a difusão que é um fenómeno de transporte de matéria onde o soluto é transportado devido aos movimentos das moléculas de um fluido que fazem com que o soluto passe das zonas de maior concentração, para zonas de menor concentração (Monteiro 2010; Simas, 2007).

O CO<sub>2</sub> no seu estado gasoso não consegue reagir diretamente com os hidratos da pasta cimentícia. A difusão gasosa do CO<sub>2</sub> na fase aquosa dos poros do betão dá-se pela sua dissolução na água. A difusão é um fenómeno passivo de transporte em que o dióxido de carbono penetra lentamente na rede de minúsculos canais internos da estrutura do betão e a partir daqui ocorre a sua dissolução. Os poros e capilares de maiores dimensões que não contêm solução, funcionam como vias de acesso ao interior do betão e os poros e capilares saturados funcionam como meios de difusão (Simas, 2007).

Como referido anteriormente, para que a carbonatação ocorra naturalmente, é necessário que o dióxido de carbono seja dissolvido na água – Reação 3.8 (Salta, 1996; Simas 2007):



Dissolvido o CO<sub>2</sub>, dá-se a reação com os hidróxidos de metais alcalinos (Reação 3.9) e (Reação 3.10) e posteriormente com o hidróxido de cálcio (Reação 3.11) e os silicatos e aluminatos do cimento (Reação 3.12), (Reação 3.13) e (Reação 3.14).

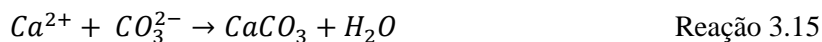


Desta forma, o CO<sub>2</sub> penetra para o interior do betão, reagindo com os hidróxidos de sódio e potássio presentes na zona intersticial, fazendo diminuir a sua concentração e simultaneamente aumentar a solubilidade dos hidróxidos de cálcio (Salta, 1996; Simas 2007).

Da reação dos hidróxidos de cálcio com o dióxido de carbono forma-se o carbonato de cálcio num processo de difusão de CO<sub>2</sub> para o interior do betão e um processo de difusão de NaOH, KOH e Ca(OH)<sub>2</sub> para a frente de carbonatação. No caso do NaOH e do KOH, como se encontram em pequenas quantidades na pasta de cimento, o seu papel na carbonatação é muito reduzido ao contrário do Ca(OH)<sub>2</sub> que tem um papel muito importante no processo da carbonatação. A longo prazo o CO<sub>2</sub> reage posteriormente com os outros compostos do cimento hidratado, silicatos e aluminatos de cálcio (Salta, 1996; Simas 2007).

O elevado valor de pH do betão deve-se ao Ca(OH)<sub>2</sub> mas com o desenvolvimento das reações descritas anteriormente resultado da dissociação dos iões bicarbonato HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> em iões

hidrogénio  $H^+$  e iões carbonato  $CO_3^{2-}$  (Reação 3.8). O aumento de protões que confere características ácidas à solução intersticial do betão resultam na diminuição do pH. Os iões carbonato, na presença dos iões de cálcio da pasta irão formar os cristais de carbonato de cálcio (Reação 3.15). O carbonato de cálcio existe sob três formas cristalográficas, aragonite, vaterite e calcite sendo a última a mais comum no betão carbonatado (Salta, 1996; Simas 2007).



As reações 3.9, 3.10 e 3.11 são as principais responsáveis pela diminuição do pH do betão onde se vai assistindo ao desaparecimento do hidróxido de cálcio dos poros do betão fazendo com que a frente de carbonatação avance a partir da superfície e com que o pH diminua do seu valor inicial de aproximadamente 13 para valores inferiores a 9 permitindo que a corrosão do aço se desenvolva (Salta, 1996; Simas 2007).

O processo de carbonatação faz diminuir os iões  $Ca^{2+}$  existentes na solução porosa levando à dissolução de  $Ca(OH)_2$  e conseqüentemente a uma difusão de  $Ca^{2+}$  do interior para o exterior, ou seja, a superfície da estrutura de betão armado. Esta migração tende a equilibrar-se na frente de carbonatação onde a presença destes elementos é reduzida devido à baixa solubilidade de  $CaCO_3$  como se pode constatar pela Figura 3.4 (Salta, 1996; Simas 2007).

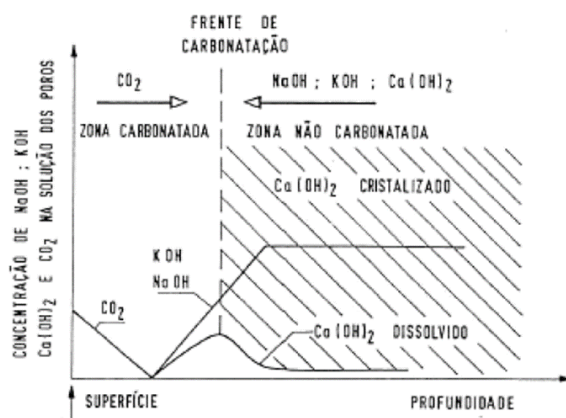


Figura 3.4 - Perfis de concentração de hidróxidos na zona da carbonatação (Costa, 2006).

Por sua vez esta migração conduz à precipitação de cristais que se alojam nos vazios do betão, tornando mais denso o betão e inevitavelmente, mais lenta a difusão de  $CO_2$ , essencial para que ocorra carbonatação (Lagerblad, 2001; Salta, 1996; Simas 2007).

A transformação de hidróxido de cálcio em cristais de calcite traduz-se num aumento de volume de 11%, o que contribui para o preenchimento do sistema de vazios do betão (Lagerblad, 2005; Simas, 2007). Pode-se assim definir três zonas como está ilustrado na Figura 3.5, a zona carbonatada onde o  $Ca(OH)_2$  foi convertido em  $CaCO_3$ , a zona não carbonatada onde o  $CO_2$  ainda não penetrou e uma zona intermédia onde se desenvolve a reação de carbonatação (Costa, 1999; Costa 2006; Simas 2007).

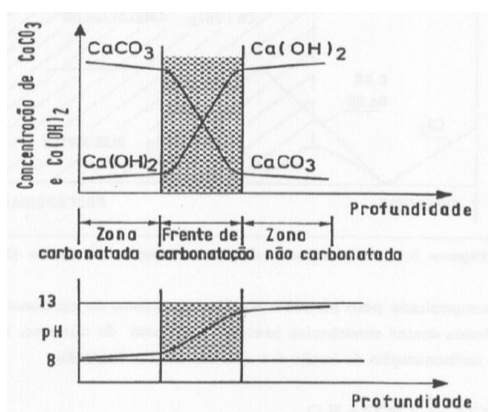


Figura 3.5 - Zonas envolvidas no mecanismo de carbonatação e variação do pH ao longo da profundidade (Costa 1999).

A carbonatação é um fenómeno que se desenvolve lentamente devido às baixas concentrações de  $\text{CO}_2$  na atmosfera e também devido à elevada quantidade de hidróxido de cálcio presente no betão que, em associação com a sua baixa permeabilidade, lhe confere uma elevada resistência à penetração do  $\text{CO}_2$  (Costa, 1999; Helene, 2001; Salta, 1996; Simas, 2007).

Apesar dos aspetos negativos da carbonatação, este processo tem alguns aspetos positivos já que, devido à transformação do hidróxido de cálcio em carbonato de cálcio, que é um produto com baixa solubilidade fazendo com que a porosidade do betão diminua, verifica-se um aumento da resistência mecânica e química do betão. A resistência à compressão pode aumentar mais de 50% (Meyer, 1987; Simas, 2007). Isto verifica-se quando se utiliza cimento Portland em que betão sem a utilização conjunta de cinzas volantes ou escórias de alto-forno. Caso contrário, a porosidade capilar é maior conduzindo a uma maior absorção e permeabilidade do betão. Nestes casos verifica-se a formação de um gel de sílica muito poroso quando se dá o processo de carbonatação (Helene, 2001; Salta, 1996; Simas, 2007).

### 3.2.2. Fatores que influenciam a velocidade de carbonatação

A carbonatação ocorre sempre que os reagentes e as condições necessárias à reação estejam reunidos, no entanto a velocidade com que a carbonatação se desenvolve é condicionada essencialmente por fenómenos de difusão gasosa, já que a difusão dos iões carbonato é muito inferior à difusão do  $\text{CO}_2$  (Lagerblad, 2005; Monteiro, 2010). Para outros autores, como Neville (1997), a carbonatação depende da pressão de penetração do agente agressivo e da humidade relativa, ou da concentração de  $\text{CO}_2$  e das condições de exposição do betão como a temperatura e humidade como defendem Uomoto e Takada (1993), ou das condições de exposição e da qualidade do betão, segundo Liang Qu e Liang (1986).

De uma forma geral, existem vários fatores e é a interação de todos eles que influenciam a velocidade de propagação da carbonatação. Estes fatores podem ser internos, ou seja, intrínsecos ao betão, ou fatores externos relativos ao meio ambiente (Monteiro, 2010).

Os principais fatores externos determinantes para que ocorra o fenómeno de difusão são a concentração de CO<sub>2</sub>, a temperatura e a humidade relativa do ar, uma vez que vão determinar o grau de saturação dos poros. A carbonatação é diretamente proporcional à temperatura e à concentração de CO<sub>2</sub> (Monteiro, 2010; Simas, 2007). Quanto aos fatores internos, a composição química do betão, tipo e qualidade do cimento, a razão água-cimento, apresentam uma forte influência na carbonatação do betão (Monteiro, 2010; Simas, 2007).

Nos pontos seguintes será feito um resumo de cada um dos fatores que mais podem influenciar a velocidade da carbonatação no betão.

### 3.2.2.1. Concentração de CO<sub>2</sub>

A concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera exerce uma grande influência na velocidade da carbonatação em estruturas de betão (Fukushima, 1988). Uma maior quantidade de CO<sub>2</sub> na atmosfera conduzirá a um aumento da velocidade de carbonatação, principalmente para betões com elevada razão água-cimento (Fukushima, 1988; Kazmierczak, 1995; Monteiro, 2010).

A velocidade da carbonatação é maior em zonas densamente urbanas ou industriais onde a concentração de CO<sub>2</sub> é maior. Nestas zonas o teor de CO<sub>2</sub> varia entre 0,30% e 1% em volume, em ambientes urbanos a concentração de CO<sub>2</sub> é de cerca de 0,10% e em zonas rurais de cerca de 0,03% em volume (Neville, 1997). Existem alguns casos em que a concentração de CO<sub>2</sub> pode ser maior do que os valores de referência, tais como túneis, armazéns, locais pouco ventilados ou com produção significativa de CO<sub>2</sub> (Simas, 2007). Segundo Neville (1997), a ação de difusão ocorre mesmo em ambientes onde a concentração desse gás na atmosfera é muito baixa, como é o caso de ambientes rurais. Os valores mais baixos são registados em zonas costeiras pois a água absorve o CO<sub>2</sub>.

Um estudo efetuado por Uomota e Takada (1993) veio confirmar a relação entre a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera e a velocidade de carbonatação. Foram estudados elementos de betão armado submetidos a concentrações de CO<sub>2</sub> de 0,07% (ambiente natural interno), 1% e 10% (ensaios acelerados). Todos os elementos se encontravam sob as mesmas condições de temperatura (T) e humidade relativa controlada (HR), (T=20°C e HR=55%). Os resultados, tal como se verifica pela Figura 3.6, vieram demonstrar que o aumento do teor de CO<sub>2</sub> levou a um aumento da velocidade de carbonatação dos betões.

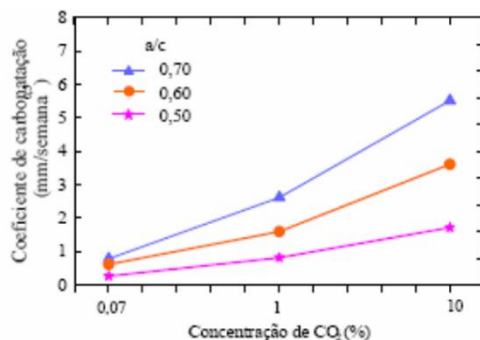


Figura 3.6 - Influência da concentração de CO<sub>2</sub> no coeficiente de carbonatação (Monteiro, 2010).

### 3.2.2.2. Humidade relativa

A humidade relativa do meio ambiente influencia a carbonatação do betão e tem um papel muito significativo na velocidade de carbonatação, já que a difusão de  $\text{CO}_2$  se dá a uma velocidade maior num meio difusor líquido do que num meio gasoso (Simas, 2007).

Apesar da humidade bloquear os poros dificultando o processo de difusão, por outro lado possibilita um meio para a reação entre o  $\text{CO}_2$  e o  $\text{Ca(OH)}_2$ . Não havendo humidade, o  $\text{CO}_2$  penetra nos poros facilmente mas a sua dissolução na água não é possível e dessa forma não gera o processo de carbonatação.

Se a humidade relativa for de 100%, o  $\text{CO}_2$  é dissolvido mas como a sua taxa de difusão na água é mais baixa do que no ar (cerca de 104 vezes), o processo de carbonatação é retardado (Monteiro, 2010). A velocidade máxima da carbonatação, ocorre numa situação intermédia em que existe a possibilidade simultânea de difusão e dissolução de  $\text{CO}_2$  no sistema de poros do betão (Simas, 2007).

Não existe um consenso quanto à percentagem de humidade relativa que conduz a maiores velocidades de carbonatação, Segundo Vénuat e Alexandre (1969), citando Verbeck (1950), em ambientes naturais, a humidade relativa que conduz a maiores velocidades de carbonatação ocorre para valores entre 45 a 60 %, tal como se verifica na Figura 3.7.



Figura 3.7 - Grau de carbonatação em função da humidade relativa do ar (adaptado de Vénuat & Alexandre, 1969).

De acordo com Parrott (1987), a taxa máxima de carbonatação pode ser observada para a exposição de humidade relativa de 60%.

Um estudo levado a cabo por Ceukelaire e Nieuwenburg em 1993 investigou a influência da humidade relativa na profundidade de carbonatação no betão. Utilizaram provetes que foram testados a diferentes concentrações de  $\text{CO}_2$  (0,03% e 10%) e humidades relativas que variaram entre os 40% e os 90%. Como se pode observar na Figura 3.8, os autores verificaram que para os diferentes teores de  $\text{CO}_2$ , a carbonatação atingiu profundidade máxima na humidade relativa de aproximadamente 50%.

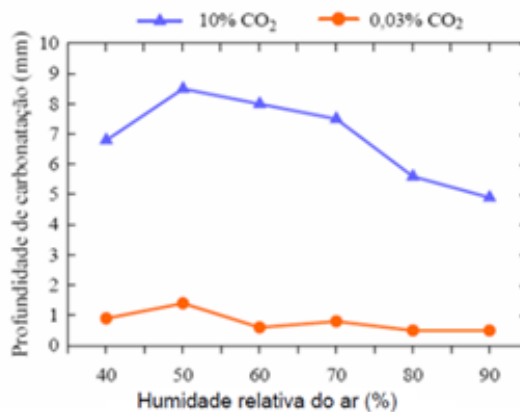


Figura 3.8 - Profundidade de carbonatação em relação à humidade relativa e o teor de CO<sub>2</sub> (Monteiro, 2010).

### 3.2.2.3. Temperatura

A influência da temperatura na velocidade de carbonatação segue a teoria de Arrhenius segundo a qual a um incremento de temperatura implica um aumento da taxa de reações químicas (Monteiro, 2010). Através de ensaios experimentais em laboratório, Uomoto e Takada (1993), conseguiram demonstrar que, eliminado o efeito do teor de CO<sub>2</sub>, se verificava o efeito da temperatura sobre a carbonatação, concluindo que as áreas de uma estrutura de betão armado sujeita a maiores exposições solares desenvolvem o processo da carbonatação com uma velocidade maior.

### 3.2.2.4. Razão água-cimento

A razão água-cimento ou água-ligante assume uma grande importância pois pode determinar a velocidade com que a frente de carbonatação evolui (Salta, 1996). A razão água-cimento vai ter uma ação determinante na estrutura porosa do betão e que irá influenciar a penetração do CO<sub>2</sub>. Quanto maior for a razão água-cimento, maior será a porosidade do betão e consequentemente, maior será a difusão de CO<sub>2</sub>. Por outro lado, quanto mais baixa for a razão água-cimento, menos porosos e mais compactos serão os betões e, desse modo, mais resistentes ao avanço da carbonatação (Salta, 1996). Analisando a Figura 3.9 podemos verificar que a um aumento da razão água/cimento corresponde também um aumento da profundidade de carbonatação.

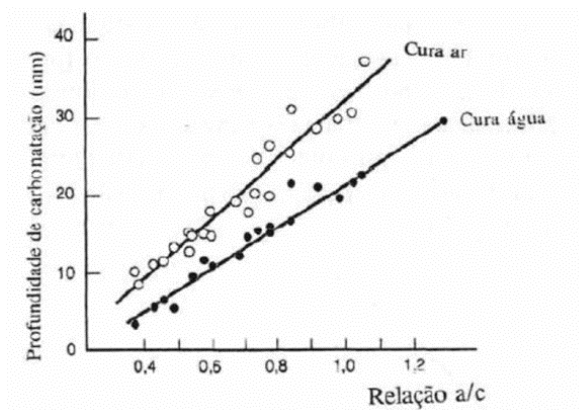


Figura 3.9 - Influência da razão água/cimento na profundidade de carbonatação (Salta, 1996).

Por outro lado, quanto maior for a quantidade de cimento por metro cúbico de betão, menor será a profundidade de carbonatação já que o avanço da frente de carbonatação é inversamente proporcional à reserva alcalina disponível na pasta de cimento hidratada e que por sua vez é função da composição química do cimento (Salta, 1996).

Quanto às adições feitas aos betões como por exemplo as cinzas volantes e as escórias, vários autores apontam alguns efeitos negativos destes produtos na carbonatação. No caso das cinzas volantes esse efeito pode ser verificado em betões com teores de cinzas volantes superiores a 30% e no caso das escórias, a carbonatação é cerca de 1,5 vezes superior à do betão apenas com cimento Portland (Salta, 1996). Segundo Maria Manuela Salta (1996), as adições de sílica de fumo praticamente não têm influência na carbonatação excetuando o caso dos betões de baixa resistência à compressão.

Estes produtos conduzem a pastas de cimento com menor teor em hidróxido de cálcio o que diminui a capacidade de fixação do CO<sub>2</sub> pela pasta de cimento, fazendo com que seja necessário um menor teor de CO<sub>2</sub> para carbonatar o betão. Pelo lado positivo, utilizando estes produtos, verifica-se um refinamento da estrutura porosa do betão, sendo uma mais-valia uma vez que reduz a difusão do CO<sub>2</sub>, abrandando assim a sua penetração (Salta, 1996).

### **3.2.2.5. Compactação e cura**

A compactação do betão e as condições de cura são fatores importantes no fenómeno da carbonatação, uma vez que determinam a dimensão e continuidade dos poros dentro do betão quando este endurecer. Quanto maior o tempo de cura, maior será o grau de hidratação do cimento, menor será a porosidade e permeabilidade e, por consequência, menor será a carbonatação (Helene, 2001).

É fundamental que o betão seja bem compactado de forma a assegurar um bom recobrimento das armaduras e uma boa distribuição dos agregados que constituem o betão de forma a reduzir os poros por onde o CO<sub>2</sub> possa circular. É vulgarmente reconhecido que os betões mais bem compactados têm coeficientes de difusão inferiores comparados com aqueles que não foram compactados (Helene, 2001).

Em relação à cura do betão, se esta não for feita com cuidado, a insuficiência de hidratação perturba determinadas reações químicas gerando um betão mais poroso e muito mais vulnerável ao processo de carbonatação permitindo assim a difusão do CO<sub>2</sub> e consequentemente o acesso de substâncias agressivas às armaduras (Salta, 1996). Thomas e Matthews (1992) avaliaram a influência da cura na carbonatação do betão, ao longo de 4 anos, constatando uma influência significativa na redução da profundidade da carbonatação em betões com tempos de cura mais elevados. Na Figura 3.10 pode-se concluir que a profundidade da carbonatação é superior em casos em que possuam uma cura deficiente ou mal executada.

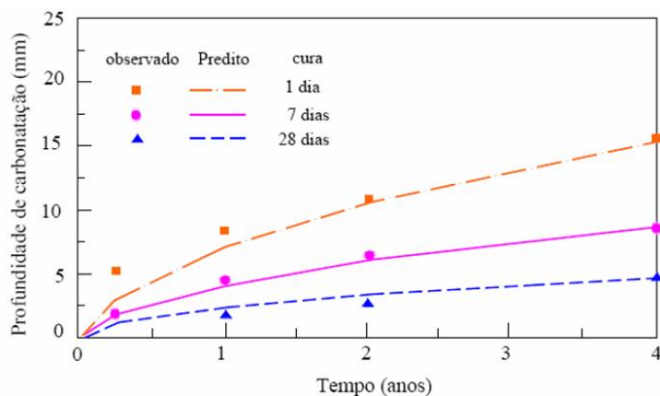


Figura 3.10 - Influência da cura do betão na profundidade de carbonatação (Monteiro, 2010).

### 3.2.2.6. Classe de resistência

Embora não influencie diretamente a carbonatação, a resistência à compressão do betão é um fator que constitui um bom indicador da velocidade com que esta ocorre (Simas, 2007). Existem várias fórmulas empíricas que relacionam a profundidade de carbonatação com a resistência à compressão característica aos 28 dias. Uma das mais conhecidas expressões é dada por Parrott (1987):

$$X_c = 125 \exp(-0,05 f_{c28})$$

$X_c$  – profundidade de carbonatação (mm)

$f_{c28}$  – resistência à compressão característica aos 28 dias (MPa)

Ensaio em laboratório já vieram confirmar a relação entre a classe de resistência à compressão e a profundidade de carbonatação, verificando que o aumento da classe do betão faz aumentar a resistência à carbonatação (Figueiredo et al., 1994; Simas 2007). A Figura 3.11 demonstra essas conclusões, onde podemos verificar que quanto maior for a resistência à compressão, menor profundidade de carbonatação se verifica nos betões analisados.

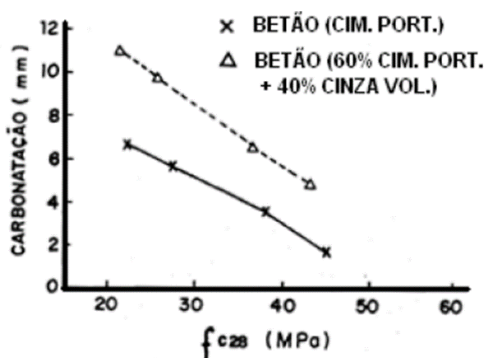


Figura 3.11 - Influência da resistência à compressão do betão sobre a carbonatação (Figueiredo et al., 1994).

Outros ensaios laboratoriais também demonstraram que a profundidade da carbonatação no betão, para um teor de CO<sub>2</sub> de 100%, decresce com o incremento da resistência à compressão axial do betão, como comprova a Figura 3.12 (Jack et al., 1994).

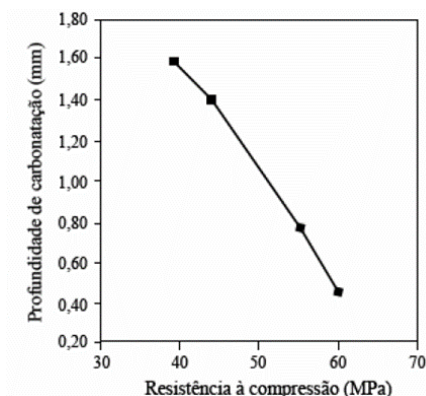


Figura 3.12 - Relação entre a resistência à compressão e a profundidade de carbonatação (adaptado de Jack et al., 1994).

### 3.2.2.7. Fissuras

A carbonatação do betão é um fenómeno gerado através de um conjunto de reacções que se dão a partir da superfície para o interior do betão. Na presença de fissuras superficiais a área de exposição ao  $\text{CO}_2$  aumenta permitindo uma maior e mais profunda penetração do  $\text{CO}_2$ . No entanto o processo de carbonatação pode ser responsável pelo fechamento voluntário da fissura dependendo para isso da abertura das fissuras e da quantidade de iões  $\text{OH}^-$  e da água no interior da fissura (Monteiro, 2010; Simas, 2007). Na Figura 3.13 pode-se observar uma representação esquemática do processo de carbonatação dentro de uma fissura.

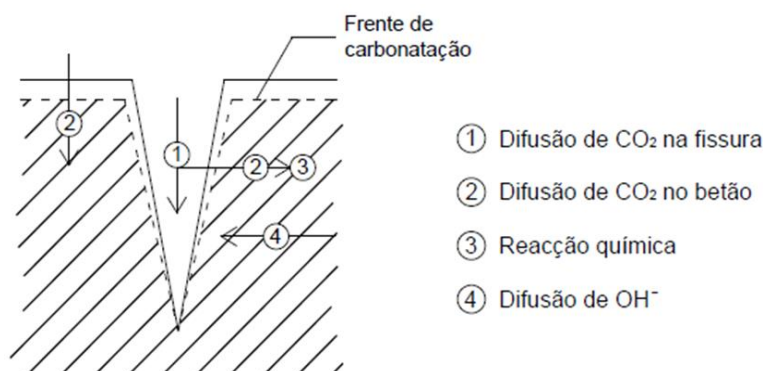


Figura 3.13 - Representação esquemática da carbonatação no interior de uma fissura (Simas, 2007).

### 3.2.3. Corrosão induzida por cloretos

A contaminação do betão por cloretos pode ter várias proveniências sendo a principal a exposição natural do betão com ambientes marítimos, quer seja em zonas de rebentação, em zonas em que as estruturas estão submersas ou através de salpicos. Outra das formas de contaminação do betão por cloretos são os processos industriais como é o caso da aplicação de sais de degelo em pontes ou em estradas (Andrade et al., 1998; Broomfield, 1997; Salta, 1996; Santos, 2014). A utilização de produtos químicos em tanques de água salgada, salinas, piscinas ou aquários são outra das formas de presença de cloretos. No processo de fabrico do betão, os cloretos podem ser introduzidos através de agregados contaminados cuja lavagem após a extração não foi bem executada, através de água de amassadura com resíduos ou impurezas de origem salina ou através

da adição de adjuvantes como os aceleradores de presa que contêm cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ) (Andrade et al., 1998; Broomfield, 1997; Fallé, 2012; Salta, 1996; Santos, 2014).

No betão armado, a presença dos cloretos desencadeia o fenómeno de corrosão das armaduras quando estes atingem um valor elevado chamado normalmente de limite crítico (Diamantino, 2012; Fernandes & Montemor, 2012; Santos, 2014). A incorporação de cloretos no processo de fabrico do betão não constitui uma situação alarmante por si só já que o teor de cloretos é baixo, no entanto pode-se tornar uma situação preocupante caso esteja em contacto com um ambiente com elevadas concentrações, nomeadamente em zonas costeiras e ambientes marítimos e mais precisamente quando a estrutura está sujeita a marés (Broomfield, 1997; Diamantino, 2012; Santos, 2014).

A velocidade de corrosão num ambiente contaminado por cloretos varia entre 50 a 500  $\mu\text{m}/\text{ano}$  (Andrade, 1992; Santos, 2014). Na Figura 3.14 podem-se observar as diferentes zonas sujeitas a corrosão em ambiente marítimo.

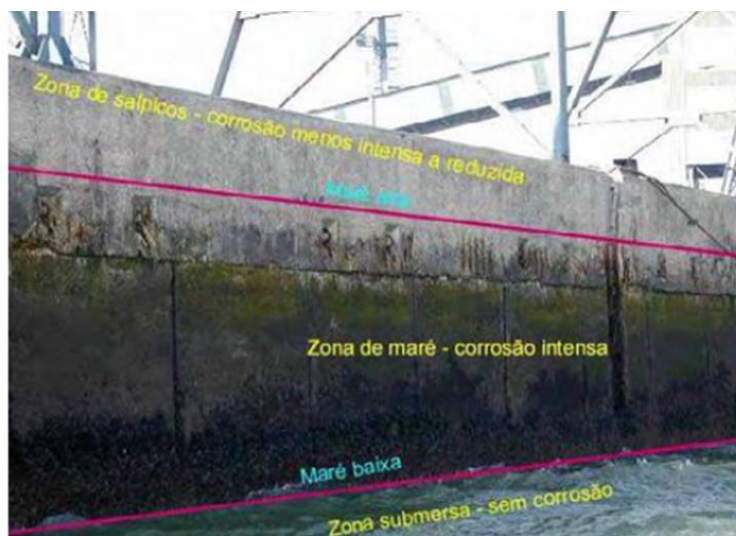


Figura 3.14 - Intensidade de corrosão em diferentes zonas em ambiente marítimo (Santos, 2014).

Devido à maior agressividade dos cloretos provenientes do exterior, é necessário ter em conta alguns fatores como o intervalo de tempo necessário para atingirem o nível das estruturas (depende da qualidade do betão, da espessura de recobrimento e de outros fatores intrínsecos), o limite crítico de concentração que provoca a despassivação das armaduras (definido na normalização, no qual já é implícito um coeficiente de segurança devido aos riscos inerentes) e a intensidade da velocidade de corrosão, uma vez desencadeado este fenómeno (Andrade et al., 1999).

A atuação da corrosão induzida por ataque de cloretos é do tipo localizada (ou por picadas ou “pitting”) em que os ataques abrangem uma área limitada (chamados pits) e os principais efeitos são a deterioração das armaduras reduzindo a secção das mesmas e originando também perda de ductilidade dos varões (Pina, 2008; Santos 2014).



Figura 3.15 - Exemplificação de corrosão por picadas - pitting (adaptado de Santos, 2014).

A densidade de corrente anódica é bastante superior à catódica devido à diferença de áreas entre regiões anódica e catódica devido aos ataques pontuais de área diminuta em conjunto com uma dissolução acentuada conduzindo a uma diminuição da resistência à tração do aço (Coito, 2008; Fernandes & Montemor, 2012).

Quando a contaminação por cloretos atinge valores elevados por decréscimo do pH ou por ação do CO<sub>2</sub>, a película de passivação pode ser destruída em grandes áreas, correspondendo a um tipo de corrosão uniforme. A acumulação dos produtos de corrosão ao nível das armaduras origina forças de tensão internas que provocam a fissuração e em casos extremos a delaminação do betão (Andrade et al., 1998; Andrade, 1992; Bertolini et al., 2004; Fernandes & Montemor, 2012).

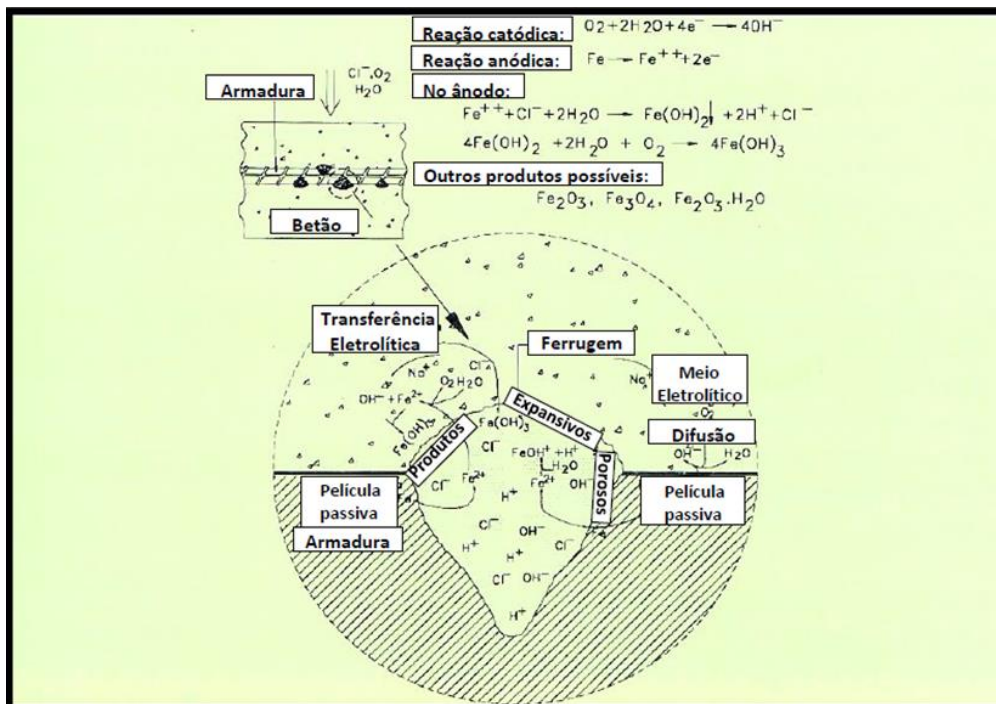
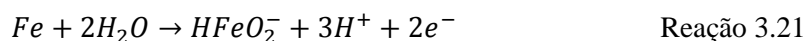
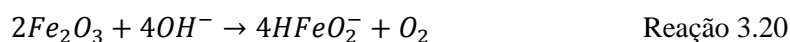
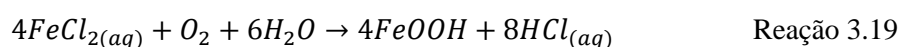
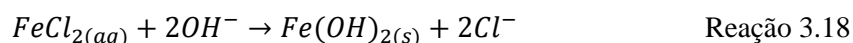
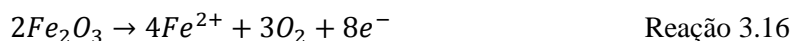


Figura 3.16 - Mecanismo e forma de atuação da corrosão das armaduras por picadas (Santos, 2014).

A Figura 3.16 retrata o mecanismo e forma de atuação da corrosão das armaduras por picadas. Este mecanismo de reação de origem da corrosão e a sua propagação por picadas é considerado como sendo autocatalítico, como se verifica nas reações 3.16 e 3.21. Deste modo, os iões Cl<sup>-</sup> não são consumidos no processo de corrosão dando assim continuidade ao processo. Com a chegada dos cloretos ao nível das armaduras é potenciada a dissolução do Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e é produzido

o  $\text{FeCl}_2$  e sucessivamente, o cloreto de ferro vai consumindo os iões  $\text{OH}^-$  provenientes da reação 3.16 decrescendo assim a alcalinidade do meio e potenciando a formação de iões  $\text{Cl}^-$ , produtos de corrosão  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  e a oxidação do hidróxido de ferro (II) a oxi-hidróxido de ferro (III). Associado ao excesso de carga positiva resultante da dissolução metálica ( $\text{Fe}^{2+}$ ), gera-se um aumento da concentração de  $\text{Cl}^-$  na área anódica (preservação da eletroneutralidade), promovendo um novo ataque aos  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  resultantes da despassivação, a produção de  $\text{FeCl}_2$  e a sua difusão para a zona catódica, originando mais produtos de corrosão (Coito, 2008; Hernández, 2012; Santos, 2014).



### 3.2.3.1. Mecanismos de transporte e influência das condições de exposição

A penetração dos cloretos do ambiente exterior para a rede capilar do betão resulta da combinação de vários mecanismos de transporte que são dependentes das condições de exposição da estrutura de betão armado (ciclos molhagem e secagem, condições de imersão, vento, altitude, distância ao mar, pH, temperatura e humidade relativa do ar) e das características do betão (idade, agregados, presença de fissuras, porosidade, razão a/c, tipo e quantidade de ligante) (Coutinho, 2005; Salta, 1996; Santos, 2014).

Em relação aos mecanismos de transporte, estes podem processar-se por sucção ou absorção capilar, permeação, difusão ou eletromigração (Santos, 2014).

O mecanismo de transporte por sucção ou absorção capilar corresponde ao mecanismo de transporte da água e dos seus iões constituintes para a estrutura porosa do betão por capilaridade, e acontece geralmente quando a estrutura se encontra submetida a ciclos de molhagem e secagem, como por exemplo em zonas de maré ou de rebentação e é influenciado pelas dimensões da rede capilar do betão (Coito, 2008; Coutinho, 2005; Laje, 2013; Santos, 2014; Silva, 2007).

O mecanismo de transporte por permeação corresponde ao caudal escoado através da estrutura porosa por gradiente de pressão (condições de saturação) ou por gradiente hidráulico (condições submersas) (Coito, 2008; Coutinho, 2005; Santos, 2014). Este mecanismo de transporte de líquidos ou gases torna-se relevante em estruturas permanentemente submersas submetidas a elevadas pressões hidrostáticas (Coito, 2008; Laje, 2013; Santos, 2014).

No mecanismo de difusão a penetração iónica é gerada por gradiente de concentração na ausência de gradientes de pressão hidráulica, que pode ter origem num gradiente de potencial

químico, temperatura ou humidade, cuja máxima intensidade se verifica em condições de saturação (Coito, 2008; Coutinho, 2005; Pereira, 2001; Santos, 2014). Este mecanismo de transporte é o de maior atividade na penetração de cloretos (apesar de ser também associado à carbonatação) no caso de o betão ser suficientemente compacto e não ter fissuras, no entanto, se estas condições não se verificarem, o mecanismo de transporte predominante é a absorção (Costa, 1997; Laje, 2013; Santos, 2014; Silva, 2007).

Por fim, o mecanismo de transporte por eletromigração correspondente à movimentação dos iões cloreto gerada pela corrente elétrica proveniente das diferenças de potencial elétrico num processo eletroquímico ou resultante da ação de campos elétricos externos (Salta, 1996; Santos, 2014; Varela, 2010).

Nos ciclos de secagem e molhagem, os cloretos dissolvidos penetram no betão por absorção capilar e alguns por difusão e no período da secagem, estes permanecem fixos por absorção junto das moléculas de água que formam a película que reveste o interior dos poros e continua a decorrer o processo de difusão (Laje, 2013). Quando as estruturas se encontram completamente submersas, os mecanismos principais são a difusão e a permeação. Neste processo os cloretos passam para a pasta de cimento que fixa, química e fisicamente, uma certa quantidade destes iões, podendo ocorrer reações entre eles e o aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e o silicato de cálcio hidratado (CSH). Os betões com elevado teor de  $C_3A$  apresentam maior capacidade de fixar os cloretos e formar monocloroaluminato tricálcico hidratado (sal de Friedel) (Bentur et al., 1997).

A Figura 3.17 contém uma representação esquemática dos mecanismos de transporte dos cloretos numa estrutura de betão armado. Sucintamente, os mecanismos de maior influência no transporte de cloretos em ambiente marítimo são a difusão pura no betão saturado de água e a absorção/desorção devido aos ciclos diários de secagem e molhagem (Santos, 2014).

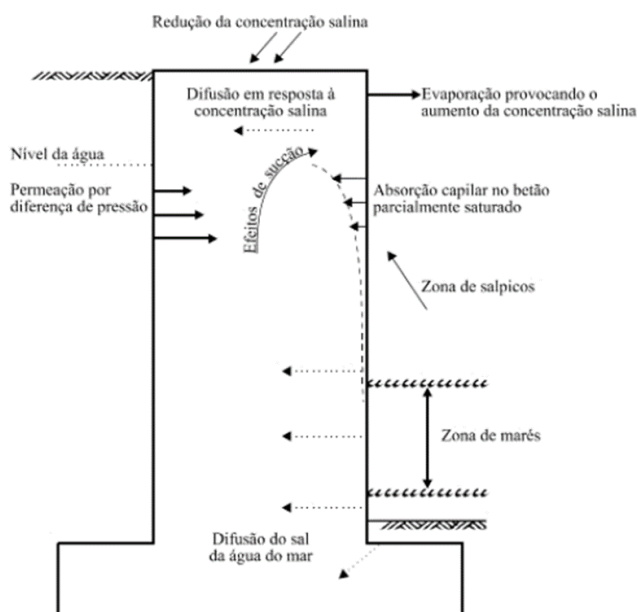


Figura 3.17 - Mecanismos de transporte dos cloretos numa estrutura de betão armado em ambiente marítimo (Santos, 2014).

A ação dos ventos também tem influência na quantidade de cloretos introduzidos no betão. As áreas mais expostas à ação dos ventos são geralmente as que se encontram em contacto maioritário com as chuvas que provocam a lavagem superficial do betão fazendo uma dispersão dos cloretos para o exterior devido ao fenómeno da lixiviação (Coutinho, 2005; Salta, 1996; Santos, 2014). A altura do elemento de betão armado e o seu posicionamento relativo em relação ao nível médio das águas do mar também constituem fatores que influenciam a penetração de cloretos no betão (Bertolini et al., 2004; Coutinho, 2005).

As maiores concentrações de cloretos à superfície do elemento correspondem às altitudes mais elevadas (entre 6 a 10 m), nos quais predominam os efeitos de evaporação da água devido à variação da humidade provocada pelos ciclos de molhagem e secagem que, em associação com o oxigénio, tornam esta área das estruturas de elevado risco de corrosão (Flores-Colen, 2008; Helene, 2001). Nestas zonas da estrutura predomina a sucção capilar como mecanismo de transporte á superfície do betão e a difusão nas camadas inferiores até ao nível das armaduras (Bertolini et al., 2004; Gonçalves, 1996). Para altitudes inferiores, a difusão dos iões cloreto ocorre a uma velocidade muito superior, já que a estrutura se encontra mais próxima do nível do mar, em persistente contacto com a água e com uma maior concentração de cloretos. Os mecanismos de transporte processam-se mais rapidamente, ou seja, por difusão e com uma penetração mais profunda. Através da Figura 3.18 é possível observar que a profundidade máxima de penetração de cloretos numa estrutura marítima ocorre sensivelmente aos 2 m de altitude (Bertolini et al., 2004; Costa, 1997; Laje, 2013; Santos, 2014).

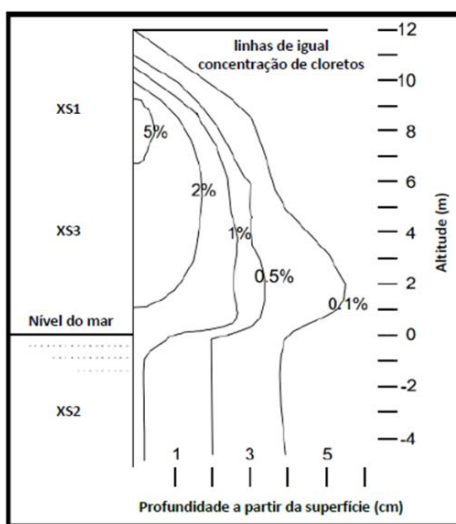


Figura 3.18 - Exemplificação da penetração de cloretos numa estrutura marítima em função de diferentes altitudes (Cimento Portland Normal; razão água-cimento = 0,5; C3A= 10%) (Santos, 2014).

### 3.2.3.2. Limite crítico de cloretos

Estando já incorporados no betão, os cloretos podem subsistir sob a forma de cloretos livres dissolvidos na solução aquosa, adsorvidos fisicamente à superfície dos poros ou quimicamente ligados por adsorção química como se verifica na Figura 3.19 (Coutinho, 2005;

Salta, 1996). Neste último caso e tendo em consideração que o teor de cloretos livres é o principal interveniente na corrosão das armaduras, à medida que os iões  $\text{Cl}^-$  se combinam com a pasta cimentícia e em conjunto com o aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ) formam-se cloroaluminatos de cálcio, também conhecido como sal de Friedel, reduzindo a velocidade de penetração e diminuindo a concentração de cloretos livres suscetíveis de se difundir na solução porosa (Coutinho, 2005; Laje, 2013; Salta, 1996, Santos, 2014).

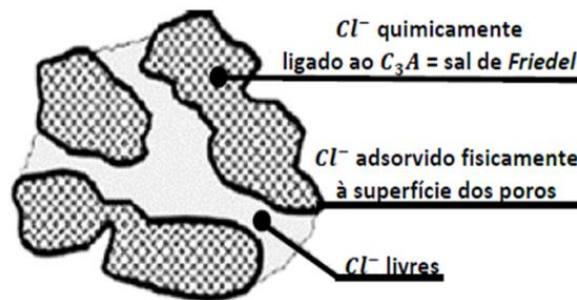


Figura 3.19 - Representação esquemática das três formas de cloretos no betão (Santos, 2014).

O fenómeno da corrosão desencadeia-se quando o teor de cloretos livres na interface aço-betão excede um determinado limite (Fernandes & Montemor, 2012). Estabelecer o limite crítico de cloretos não tem sido uma tarefa fácil ao longo dos anos, já que é influenciado por diversos fatores (Bertolini et al., 2004; Coutinho, 2005; Salta, 1996; Santos, 2014).

Um dos fatores que gera alguma controvérsia relaciona-se com o facto do teor crítico de cloretos ser variável com a alcalinidade do meio, uma vez que, os vários tipos de cimento existentes apresentam diferentes níveis de pH, bem como alterações nas concentrações de  $\text{OH}^-$ , o que é diretamente proporcional ao pH do betão, isto é, quanto mais alcalino for o betão, maior terá de ser o teor de cloretos para desencadear o processo de corrosão (Bertolini et al., 2004; Broomfield, 1997; Fernandes & Montemor, 2012).

Apesar disso, existe uma equação empírica (Equação 3.1) que, de um modo geral, representa o risco de iniciação da corrosão por ação dos cloretos. Esta equação é válida para uma concentração de cloretos de 0,4% da massa de cimento se estes forem incorporados na massa de betão e a 0,2% se o processo de penetração for o de difusão (Broomfield, 1997; Fernandes & Montemor, 2012).

$$\frac{C_{\text{Cl}^-}}{C_{\text{OH}^-}} > 0,6 \quad \text{Equação 3.1}$$

A partir dessa equação, ensaios laboratoriais vieram demonstrar que o valor teórico não é constante, já que à medida que o rácio entre a concentração de cloretos livres e iões hidróxido aumenta na solução porosa do betão, a taxa de corrosão irá também aumentar, como se pode constatar pela Figura 3.20 (Fernandes & Montemor, 2012).

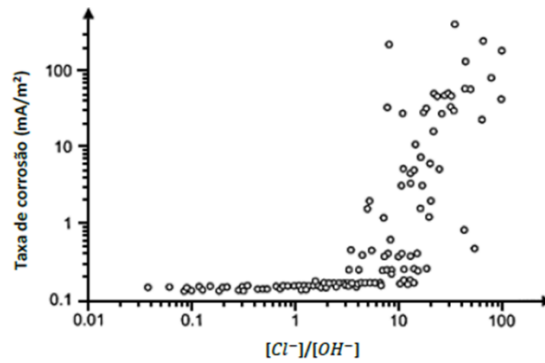


Figura 3.20 - Variação da concentração do rácio entre íões cloreto e íões hidróxido em função da taxa de corrosão (Santos, 2014).

O limite crítico de cloretos não é um valor constante, sendo necessário contar com outros fatores que podem influenciar o seu valor, tais como o tipo de cimento, a razão água-cimento, a humidade, a temperatura, o estado de conservação dos varões, a profundidade de carbonatação, a permeabilidade e a espessura do recobrimento das armaduras (Coutinho, 2005; Salta, 1996; Santos, 2014). No caso de uma estrutura de betão estar afetada pelo fenómeno da carbonatação, o teor crítico de cloretos necessário para iniciar a corrosão será inferior em comparação com um betão são (Coutinho, 2005; Salta, 1996; Santos, 2014). Na eventualidade do teor de cloretos ser inferior ao limite crítico, o processo de corrosão não se desenvolve, já que estes detêm a capacidade de se ligarem quimicamente aos constituintes da pasta cimentícia (Coutinho, 2005; Salta, 1996; Santos, 2014).

Em ambientes com humidade relativa do ar de cerca de 50% a probabilidade de ocorrência de corrosão é baixa devido à falta de H<sub>2</sub>O, que constitui um elemento indispensável para a concretização das reações eletroquímicas (Broomfield, 1997). Por outro lado, em condições de saturação total em que a humidade relativa do ar é de cerca de 100%, a baixa acessibilidade de O<sub>2</sub> constitui um obstáculo à iniciação da corrosão, ressalvando que se o O<sub>2</sub> se tornar presente, os fenómenos de ataque localizado irão iniciar-se de imediato (Broomfield, 1997). Na Figura 3.21 estão representados alguns fatores que influenciam o limite crítico de cloretos.

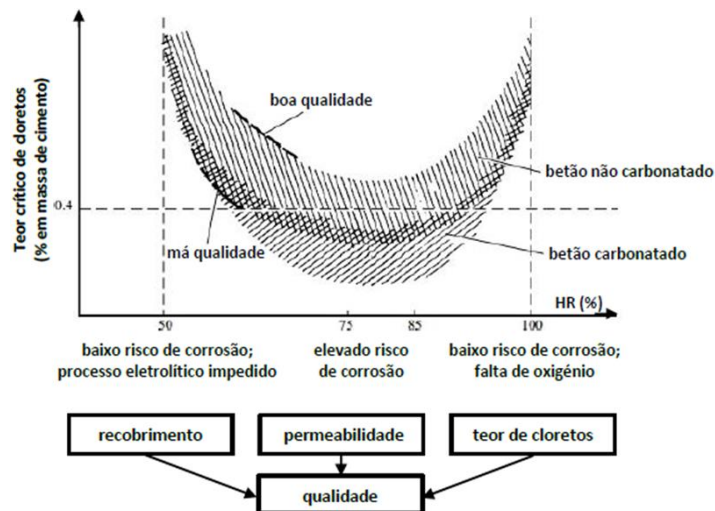


Figura 3.21 - Representação de alguns fatores que influenciam o limite crítico de cloretos (Santos, 2014).

A norma NP EN 206-1:2007 recomenda um valor máximo admissível do teor de cloretos para uma estrutura de betão armado, o qual é exibido na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Classes do teor de cloretos do betão (NP EN 206-1, 2007)

Máximo teor de cloretos admissível		
Utilização do betão	Classes de exposição ambiental	
	XC	XS/XD
Betão com armaduras de aço ou outros metais embebidos	$Cl^- 0,4^{aj}$	$Cl^- 0,2^{aj}$
<i>aj) Estas classes podem não ser aplicadas caso sejam tomadas medidas especiais de proteção contra a corrosão, como a proteção do betão ou recobrimentos, devidamente justificados, ou a utilização de aços inoxidáveis.</i>		

### 3.2.3.3. Fatores que influenciam o coeficiente de difusão de cloretos

Embora não exista um fator que estime a resistência do betão à ação dos cloretos, nem uma forma de determinar a quantidade de iões necessária para destruir pontualmente a camada de passivação das armaduras, existem alguns parâmetros que influenciam o início do processo de corrosão e a progressão do ataque por parte dos cloretos, para além dos fatores que controlam os mecanismos de transporte (Gonçalves, 1996; Santos, 2014).

Com o intuito de modelar o perfil de penetração de cloretos no betão, aplicam-se as leis da difusão em que a mais conhecida é a 2ª Lei de Fick em regime não estacionário, que em conformidade com vários autores, traduz satisfatoriamente o mecanismo de penetração de cloretos para os respetivos períodos de exposição (Equação 3.2) (Bertolini et al., 2004; Santos, 2014).

$$C(x, t) = Cs(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}) \quad \text{Equação 3.2}$$

Esta expressão não é reconhecida de forma unanime, devido à sua conduta a apreciações excessivamente limitadas na aplicação da função de erro (*erf*) aos modelos de previsão de vida útil e ao facto de ter sido demonstrado que a velocidade de difusão dos cloretos (*D*) e a sua concentração à superfície (*Cs*) não são constantes (Appleton & Costa, 1999; Gonçalves, 1996; Salta, 1996; Santos, 2014). Outro aspeto, que não é quantificado nesta expressão, é a possibilidade de fixação química dos iões cloretos na mistura cimentícia, o que significa que a redução dos seus teores livres constitui uma variável expressiva, de acordo com o tipo de ligante presente (Appleton & Costa, 1999; Bertolini et al., 2004; Salta, 1996; Santos, 2014).

- Razão água-cimento

A razão a/c é um fator importante no processo da difusão dos cloretos, uma vez que, quanto maior for essa razão, menor será a resistência do betão à penetração dos cloretos. A diminuição da razão a/c traz benefícios em determinadas propriedades da matriz cimentícia como a porosidade, a permeabilidade e a absorção, fazendo com que se verifique uma baixa penetração dos cloretos, como se pode observar na Figura 3.22. Em sentido inverso, o aumento da razão a/c potencia um maior coeficiente de difusão de cloretos (Laje, 2013; Salta, 1996).

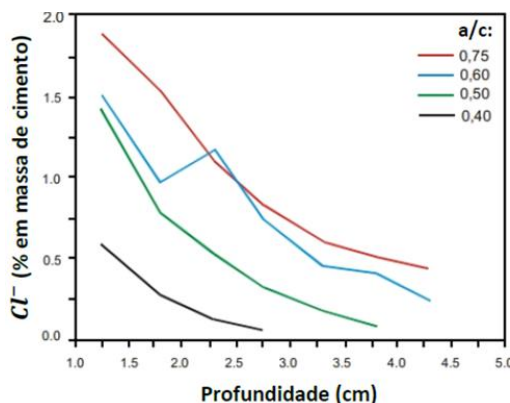


Figura 3.22 - Influência da razão água-cimento na penetração de cloretos (Santos, 2014).

- Compactação e cura do betão

A compactação do betão pode em conjunto com a razão água-cimento assumir importância no decréscimo da permeabilidade e conseqüentemente na diminuição da penetração de cloretos para o interior do betão (Laje, 2013; Santos, 2014). Analisando a Figura 3.23 podemos confirmar que a profundidade da penetração de cloretos aumenta quando a compactação do betão não é bem executada e sobretudo quando não é realizada a compactação do betão.

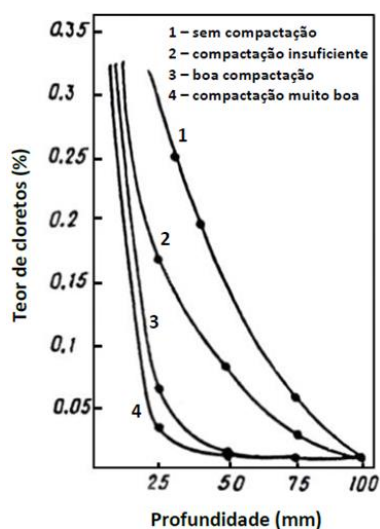


Figura 3.23 - Influência da compactação na penetração de cloretos (Santos, 2014).

Uma correta compactação do betão, origina uma diminuição dos poros capilares e macroporos (cujas dimensões são as de maior relevância a nível de durabilidade, já que os microporos – poros de gel – são de proporções ínfimas, não admitindo uma movimentação significativa de agentes agressivos no sistema de poros cimentício), o que dificulta a penetração dos iões  $Cl^-$  (Bertolini et al., 2004; Salta, 1996; Santos, 2014).

Um correto período de cura pode impedir a saída de água do betão de uma forma brusca promovendo junto com o cimento reações de hidratação que conduzem à formação de um gel rígido, designado por silicato de cálcio hidratado (CSH) que preenche os poros capilares reduzindo a permeabilidade e aumentando a compacidade e resistência mecânica da pasta

cimentícia, gerando alterações na distribuição e dimensão dos poros e consequentemente a difusão de cloretos para o seu interior (Laje, 2013; Polito, 2006; Santos, 2014; Varela, 2010).

Alguns estudos permitem verificar a influência da razão a/c na difusão dos cloretos, bem como a relação entre os períodos de cura e as profundidades de penetração dos cloretos. (Polito, 2006; Santos, 2014; Varela, 2010). A Figura 3.24 demonstra que existe uma correspondência entre os períodos de cura e as profundidades de penetração de iões cloreto, assim como a influência da razão água-cimento (Laje, 2013).

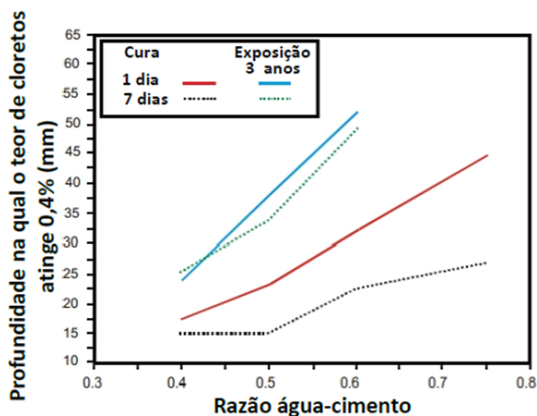


Figura 3.24 - Influência do período de cura e razão água-cimento na difusibilidade de iões cloreto (Santos, 2014).

Nos betões em que forem utilizados cimentos com adições pozolânicas, o tempo de cura do betão pode diminuir o coeficiente de difusão de cloretos. Na Figura 3.25 pode-se observar que, ao contrário dos betões com cimentos e adições pozolânicas, nos betões apenas com cimento, o coeficiente de difusibilidade de cloretos começou a aumentar a partir dos 100 dias (Laje, 2013).

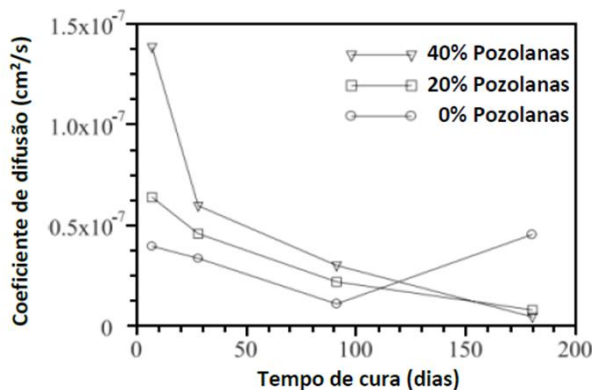


Figura 3.25 - Influência da cura e adições pozolânicas na difusibilidade de cloretos (Santos, 2014).

- Tipo e dosagem de cimento

A dosagem de cimento tem influência na resistência do betão à penetração de Cl<sup>-</sup>, uma vez que, um aumento da dosagem de cimento facilita a ligação química entre os constituintes do cimento e os cloretos, promovendo assim uma diminuição da porosidade do betão dificultando a difusão dos cloretos. A Figura 3.26 ilustra a influência da dosagem de cimento na profundidade de penetração de cloretos, onde se pode verificar que a profundidade de penetração é menor quanto maior for a quantidade de ligante (Bentur et al., 1997; El-Reedy, 2007; Santos, 2014).

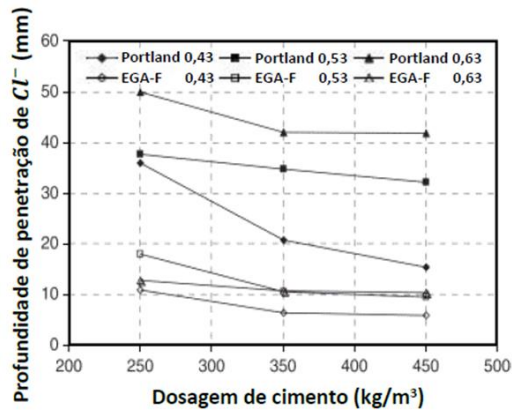


Figura 3.26 - Influência da dosagem de cimento na profundidade de penetração de cloretos (Santos, 2014).

A resistência do betão à penetração de cloretos pode ser melhorada através de adições de materiais pozolânicos como as cinzas volantes e a sílica de fumo, ou de hidráulicos latentes como a escória de alto-forno, promovendo a diminuição dos poros da pasta cimentícia, uma vez que se formam produtos de hidratação mais finos. Por outro lado, estas adições aumentam a capacidade de fixação dos cloretos e reduzem o coeficiente de difusão (Bertolini et al., 2004; Gonçalves, 1996; Laje, 2013; Pereira, 2001; Santos, 2014). Para comprovar estas afirmações foram realizados estudos de forma a determinar os coeficientes de difusão de cloretos em três misturas cimentícias distintas, uma apenas com cimento Portland Normal e outras duas com adições de cinzas volantes e escórias de alto-forno. Como se pode verificar na Tabela 3.2, os estudos demonstraram que o cimento com adição de escórias de alto-forno apresentou um menor coeficiente de difusão de cloretos (D) (Page et al., 1986; Santos, 2014).

Tabela 3.2 - Comparação de coeficientes de difusão de cloretos quantificados em regime estacionário entre três misturas cimentícias distintas (Santos, 2014).

Tipo de cimento	D (10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s)
Cimento Portland Normal	4,47
Cimento Portland com 30% de cinzas volantes	1,47
Cimento Portland com 65% de escória granulada de alto-forno	0,41

Outros estudos realizados com cimentos idênticos, embora com percentagens de adições diferentes, apresentam resultados e conclusões semelhantes, como se verifica na Figura 3.27.

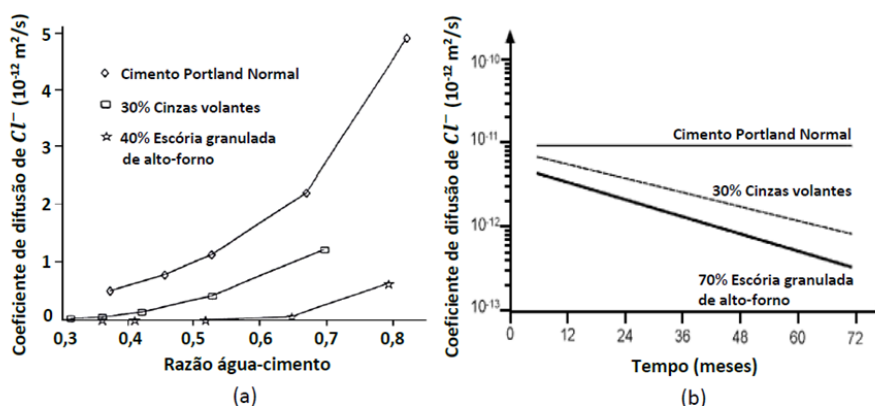


Figura 3.27 - Variação do coeficiente de difusão de cloretos: em função da razão água-cimento para diferentes tipos de cimento (a); em função do tempo para diferentes tipos de cimento expostos a uma zona de salpicos em ambiente marítimo (b) (adaptado de Santos, 2014).

É importante referir também que apesar de serem reconhecidas vantagens na utilização de cimentos com adições quando se pretende diminuir o coeficiente de difusão dos cloretos, não existe um consenso sobre qual o cimento composto de maior eficiência (Bentur et al., 1997; El-Reedy, 2007; Santos, 2014).

### 3.3. Ação conjunta de cloretos e carbonatação

Em determinadas condições de exposição das estruturas de betão armado, pode ocorrer a ação conjunta da carbonatação e dos cloretos, com efeitos prejudiciais de maior intensidade relativamente aos que seriam previstos isoladamente desencadeando o processo corrosivo prematuramente, com um significativo aumento da taxa de corrosão (Gonçalves, 1996; Santos, 2014).

As zonas de maior agressividade para a ação simultânea destes dois mecanismos são as zonas de maré ou rebentação ou as zonas onde podem ocorrer salpicos de água do mar devido a ondas ou à ação dos ventos que transportam os cloretos (Costa et al., 2001; Santos, 2014).

Em ambientes contaminados por cloretos existe frequentemente a necessidade de recorrer a cimentos compostos que devido aos seus elevados teores de alumina e quantidade suplementar de silicato de cálcio hidratado (CSH), possibilitam uma maior capacidade de fixação dos cloretos e inerente redução do teor de cloretos livres, bem como o refinamento do sistema de poros cimentício. Por outro lado, os cimentos compostos possuem uma menor quantidade de produtos alcalinos, o que perante um ambiente com elevadas concentrações de CO<sub>2</sub> implica o seu consumo acelerado e o decréscimo do pH (Santos, 2014).

No caso de um betão contaminado por cloretos, o fenómeno da carbonatação promove um aumento significativo da velocidade de corrosão (Gonçalves, 1996; Santos, 2014). Isto deve-se ao facto de os cloroaluminatos, na presença de variações do pH e da difusibilidade do CO<sub>2</sub>, reagir com os produtos de hidratação do cimento provocando um decréscimo do nível de pH, estimulando a decomposição dos cloroaluminatos (carbonatação do sal de Friedel), provenientes da combinação química dos Cl<sup>-</sup> com o aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) e/ou outros produtos de hidratação (Costa et al., 2001; Gonçalves, 1996). Deste modo, os iões Cl<sup>-</sup> previamente fixados libertam-se e dissolvem-se na solução porosa do betão, aumentando o respetivo teor de cloretos livres e inerentemente a sua agressividade (Bertolini et al., 2004; Costa et al., 2001; Santos, 2014).

Sucessivamente, os iões cloreto difundem-se para zonas internas não carbonatadas aumentando a velocidade de corrosão, uma vez que determinadas zonas ficam sensíveis à ação do CO<sub>2</sub>, enquanto outras expostas à ação dos cloretos (Santos, 2014; Vesikari, 2009). Quanto à ação dos cloretos na velocidade e profundidade de carbonatação existem várias abordagens e teorias em relação a este tema, estando em curso ainda muitos estudos em desenvolvimento sobre este tema, bem como modelos analíticos que possibilitem a previsão da ação conjunta dos Cl<sup>-</sup> e do CO<sub>2</sub> (Santos, 2014; Vesikari, 2009).

Segundo Arlindo Gonçalves (1996), a ação dos cloretos no betão carbonatado pode atenuar a evolução da carbonatação. Por outro lado, Erkki Vesikari (2009) afirma que os cloretos livres são sais higroscópicos com tendência a absorver a humidade, impedindo a evaporação da água pelos poros capilares. Deste modo, ao reduzirem a conectividade e dimensão da estrutura porosa do betão (devido à absorção da humidade retida nos poros) dificultam a difusibilidade do CO<sub>2</sub> retardando assim as reações necessárias ao processo de carbonatação (Santos, 2014). Como se poderá verificar na Figura 3.28, a profundidade de carbonatação decresce à medida que aumenta a concentração de iões cloreto na solução porosa de betões constituídos por cimentos compostos (adições de 30% de cinzas volantes) a médio prazo (Gonçalves, 1996; Montemor et al., 2002; Santos, 2014).

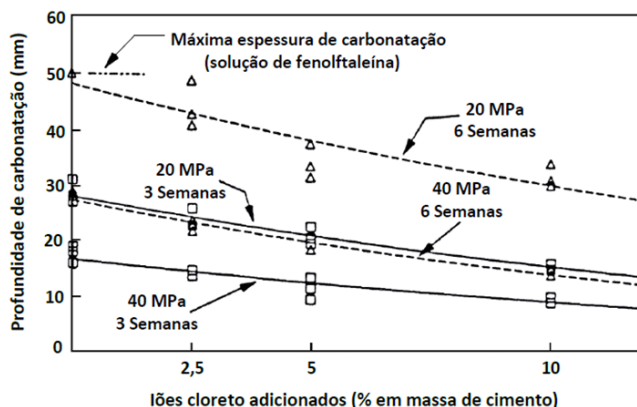


Figura 3.28 - Influência da difusibilidade de cloretos num betão carbonatado (Santos, 2014).

Num ambiente de elevada agressividade para o betão armado, a carbonatação não provoca consequências tão prejudiciais como a ação dos cloretos (Vesikari, 2009). Numa situação em que se preveja a ação combinada dos dois fenómenos de despassivação das armaduras, deverá ser atribuída uma maior importância à ação dos cloretos, selecionando um cimento com melhor capacidade de oposição aos seus efeitos, uma vez que o seu ingresso na solução porosa ocorre a uma velocidade superior à evolução da profundidade de carbonatação (Gonçalves, 1996).

## 4. MÉTODOS DE INSPEÇÃO E ENSAIO

### 4.1. Introdução

Durante a vida das estruturas de betão armado, devem ser efetuadas avaliações periódicas, com recurso a diferentes níveis de inspeção, de acordo com um regime específico de inspeções.

A reparação ou reabilitação de uma estrutura é precedida de uma inspeção rigorosa onde se identificam problemas existentes ou algumas potenciais anomalias, ou pela vontade de um dono de obra em reabilitar uma construção visivelmente degradada. Estas inspeções podem ser desde inspeções visuais até ensaios feitos *in situ* ou em laboratório.

Qualquer projeto de reparação ou reabilitação deverá seguir a metodologia sistematizada na Norma EN 1504 (2006), que define os princípios de proteção e reparação de estruturas de betão armado danificadas. Segundo esta norma, uma correta avaliação de uma estrutura existente deverá considerar os seguintes aspetos (Medas, 2013):

- a) Levantamento das condições atuais da estrutura (defeitos visíveis ou potenciais e caracterização de propriedades físicas e químicas dos materiais). Numa fase mais avançada deverá haver lugar à realização de uma campanha de ensaios *in situ* e em laboratório;
- b) Recolha de todas as peças escritas e desenhadas do projeto original, a fim de identificar o sistema estrutural, materiais utilizados e ações consideradas no dimensionamento;
- c) Conhecer o histórico da construção, identificando eventuais alterações ao uso da estrutura, obras de reforço ou reparação no decorrer da sua vida útil;
- d) Caracterização das condições de exposição ambiental;
- e) Caracterização das condições atuais e futuras de utilização.

No caso específico do betão armado, a avaliação *in situ* das suas características implica uma planificação dos trabalhos a executar em obra e dos ensaios a realizar, de acordo com o elemento e a estrutura em causa. Na definição de um plano de ensaios deve-se ter em consideração os seguintes pontos (Albergaria, 2013):

- a) Recolher informação sobre os ensaios disponíveis capazes de conduzir aos objetivos pretendidos, a sua adequabilidade às condições *in situ*, a fiabilidade dos resultados, o seu número e localização, as disposições normativas que condicionam a aplicação de cada método e, não menos importante, o efeito da aplicação do ensaio na aparência da superfície dos elementos;
- b) Conhecer, quando possível, as limitações naturais inerentes a cada equipamento de ensaio, no que diz respeito à operação, condições de aplicação, segurança e à fiabilidade dos resultados. A calibração dos aparelhos deve ser sempre verificada e os equipamentos devem ser manuseados por operadores experientes e/ou especializados;
- c) Devem ser contabilizados fatores como o estado de conservação das superfícies, a deformação dos elementos, a fendilhação, a influência da carbonatação e outras situações relacionadas com a durabilidade do betão que influenciem os resultados dos ensaios.

d) Localizar superfícies livres para aplicação dos ensaios, armaduras ou fontes de energia e de abastecimento de água que poderão ser condicionantes para alguns dos ensaios;

e) Devem ser observados os aspetos relacionados com a localização geográfica, facilidade de transporte do equipamento de ensaio, acessibilidade, condições ambientais e de segurança, necessidade de restrição ao uso da estrutura durante a intervenção. Poderá ainda ser incluída a análise dos custos previstos, que poderá ser um dos condicionantes do programa de ensaios.

#### 4.2. Inspeção visual

O exame visual constitui o método mais comum durante a inspeção das estruturas. Em estruturas de betão armado, a forma mais comum de deterioração é a corrosão das armaduras resultante da contaminação do betão por cloretos e/ou carbonatação.

A presença de corrosão é muitas vezes precedida por sinais visíveis na superfície do betão, incluindo manchas de ferrugem, fissuras ou destacamento do betão de recobrimento. No entanto, existem alguns casos onde os defeitos não estão visíveis, por exemplo, a corrosão nos cordões de pré-esforço é um defeito muito grave, mas o facto de os cordões estarem inseridos em bainhas faz com que seja muito difícil a sua deteção sem recorrer a técnicas intrusivas.

A principal fonte de informação sensorial é a visão, segundo Cóias (2006), contudo poder-se-á aplicar outras impressões sensoriais tais como a audição, o olfato, ou até mesmo o paladar, como defende Flores-Colen (2008). A inspeção visual poderá ser contemplada por um conjunto de observações adicionais simples e não destrutivas ou reduzidamente intrusivas, por forma a obter o máximo de informação durante a visita à obra (Amaral, 2013; Cóias, 2006).



Figura 4.1 - Meios auxiliares de avaliação in situ (Flores-Colen, 2008).

Em alguns casos, apenas com uma inspeção visual e a utilização de métodos simples, obtêm-se um diagnóstico assertivo das anomalias de uma estrutura. Porém, em situações mais complexas, a inspeção visual ou outros métodos de inspeção simples promovem apenas uma

primeira triagem ou recolha de informação. Este tipo de inspeção pode ser limitado, uma vez que poderá ser realizada apenas em zonas acessíveis do edifício (Amaral, 2013).

Estas inspeções apresentam algumas vantagens como a rapidez de execução, o baixo custo, a dispensa de equipamentos complexos ou dispendiosos e de outros tipos de ensaios (Amaral, 2013; Flores-Colen, 2008). Contudo as principais desvantagens da inspeção visual (sem qualquer recurso a técnicas de ensaio mais elaboradas) são a dependência da eficácia, do treino, da experiência e perspicácia dos operadores, podendo os resultados serem, por inerência, subjetivos (Amaral, 2013; Cóias, 2006).

Através da uma inspeção visual pode-se obter o diagnóstico de uma das anomalias mais correntes nos edifícios e nas estruturas de betão armado que é o fenómeno da fissuração.

Para Gonçalves (2004), a classificação de fendas e fissuras encontra-se totalmente dependente de evidências adquiridas através da observação visual, tais como a localização, extensão, profundidade, largura, estado de degradação do elemento ou zona e exigência de reparação. A Tabela 4.1 apresenta um resumo dos fatores a ter em conta na classificação de uma fissura ou fenda, através da inspeção visual (Gonçalves, 2004).

Tabela 4.1 - Fatores de classificação de fissuras ou fendas, adquiridos através da inspeção visual (adaptado de Gonçalves, 2004).

Fatores de Classificação	Observações
Direção	Analisar se a fissura é horizontal, vertical ou diagonal; Analisar se é dentada ou variável e regular; Verificar se existem fendas paralelas.
Extensão	Ver tamanho; Analisar se a fissura se estende ao longo do material ou no limite dele.
Largura	Efetuar observações e registar para além da largura se esta afunila; Anotar a hora, data, temperatura e humidade na altura em que é feita a observação.
Profundidade	Analisar o nível de construção onde a fenda ocorre e se esta se estende outro nível.
Alinhamento	Anotar os diversos níveis de materiais de ambos os lados da fenda, dado que pode haver deslocamento de um dos lados em relação ao outro. Tal permite o conhecimento do tipo de força que motiva a fissuração (intensidade e direção).
Rugosidade da Aresta	Se esta é arredondada, rugosa, polida ou lascada.
Enchimento da Fenda	Observar se a fenda se encontra limpa ou com detritos (terra, insetos, líquenes), permitindo assim determinar a sua idade.
Efeito do Tempo	Não é imperativo que uma fenda seja reparada logo que detetada. Por vezes, é vantajoso observar o seu comportamento diagnosticando a sua causa.
Elementos estruturais adjacentes	Diagnosticar os materiais próximos da fenda e respetiva condição, bem como qualquer factor no ambiente e nas proximidades da fenda que a possa ter causado, agravado ou acelerado.

### 4.3. Ensaios *in situ*

Os ensaios *in situ* são um precioso meio auxiliar de diagnóstico de uma estrutura de betão armado pois permitem uma melhor caracterização dos mecanismos de degradação como humidades ou fissuração, das variações das propriedades de elementos construtivos relacionadas diretamente com o seu desempenho e do tipo de materiais aplicados, em conjunto com ensaios laboratoriais, a partir de amostras recolhidas.

Estes ensaios podem apresentar alguns condicionalismos, entre os quais, está o aumento do tempo de inspeção e a produção de resultados confusos ou de difícil interpretação, nomeadamente quando existe falta de informação sobre os materiais (Flores-Colen, 2008). A utilização conjunta de várias técnicas de ensaio facilita a interpretação dos resultados e minimiza as limitações referidas. No entanto, e apesar das desvantagens associadas às técnicas de ensaio *in situ*, estes ensaios, mesmo com algumas limitações, permitem detetar erros grosseiros no diagnóstico ou evitar, em certos casos, a realização de análises laboratoriais (que consomem tempo e aumentam os custos da inspeção) (Flores-Colen, 2008). Existem várias formas de classificar os ensaios *in situ*, segundo vários autores. No entanto a forma mais comum de classificar os ensaios *in situ* é pelo grau de destruição que provocam. Nesse caso, existem três tipos de ensaios: destrutivos, semi-destrutivos e não destrutivos (Ferreira, 2010).

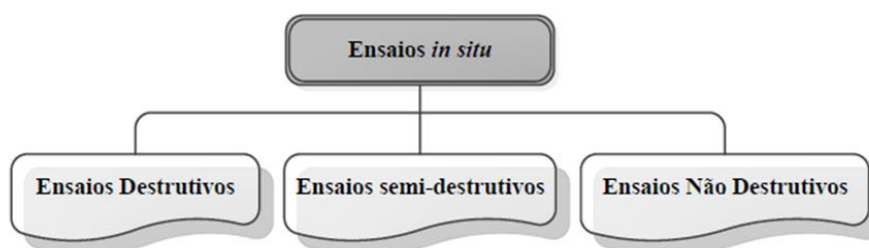


Figura 4.2 - Representação da classificação de ensaios *in situ* através do grau de destruição em elementos de betão (adaptado de Ferreira, 2010).

Neste trabalho serão apresentados dois grupos distintos de ensaios. Um dos grupos irá conter os ensaios não destrutivos e um outro grupo os ensaios destrutivos ou semi-destrutivos.

#### 4.3.1. Ensaio não-destrutivo

As técnicas de ensaio não destrutivas podem ser usadas para auxiliar na deteção precoce de processos de deterioração e avaliar a sua extensão e evolução ao longo do tempo. Na maioria dos casos os resultados destes ensaios devem ser complementados por técnicas de ensaio semi-destrutivas ou destrutivas executadas em laboratório em amostras extraídas da estrutura.

As modificações provocadas na estrutura de betão armado por este tipo de ensaios são insignificantes por ser um método não invasivo. A resistência da estrutura não sofre qualquer tipo de alteração e a sua execução é geralmente simples, rápida e de baixo custo. Através dos ensaios não destrutivos é possível detetar elementos ocultos no betão armado, efetuar a caracterização de zonas heterógenas, fazer a deteção de cavidades e vazios, avaliar o teor de humidade e algumas características físicas e mecânicas dos materiais constituintes (Moura, 2012).

##### 4.3.1.1. Ensaio esclerométrico

O esclerómetro é um instrumento utilizado para medir a dureza superficial da superfície de betão, que em condições normais, aumenta com a idade (Alves, 2008; Amaral, 2013). O esclerómetro mede a dureza superficial através do índice esclerométrico, de um dado material, baseando-se no método do ressalto que consiste no lançamento de uma massa contra a superfície

em estudo e a medição do seu retorno (Amaral, 2013; Gonçalves, 2010). O método do ressalto foi desenvolvido pelo engenheiro suíço Ernst Schmidt, que projetou o esclerómetro de Schmidt que ainda hoje é assim conhecido e aplicado em diversas áreas (Gonçalves, 2010). Na grande generalidade dos casos, em diagnóstico de betão, o equipamento mais utilizado é o esclerómetro do tipo de Schmidt, representado na Figura 4.3.



Figura 4.3 - Esclerómetro de Schmidt (Albergaria, 2013).

#### Procedimento de utilização:

Para se realizar o ensaio de esclerómetro no betão necessita-se, essencialmente, dos seguintes aparelhos: martelo esclerómetro, bigorna de calibração de aço, pedra abrasiva ou lixadeira mecânica. Antes de se realizar o ensaio procede-se à calibração do aparelho numa bigorna de calibração de aço, em que se compara o resultado do ensaio efetuado na bigorna ( $R_a$ ) com o valor de referência ( $R_r$ ), especificado pelo fabricante do aparelho (Amaral, 2013).

A norma NP EN 12504:2 (2012) especifica o princípio do funcionamento do esclerómetro, onde uma massa impelida por uma mola, embate num percutor em contacto com a superfície e o resultado do ensaio é expresso em termos da distância repercutida pela massa.

Para realizar o ensaio esclerométrico deve-se seguir as seguintes etapas (Amaral, 2013):

1. Preparar a superfície onde se vai realizar o ensaio não tem presença de água, verificando se a superfície do betão é lisa, podendo usar-se a pedra abrasiva para eliminar superfícies brandas ou rugosas com elevada textura e porosidade;
2. Selecionar o local para o ensaio com pelo menos 10 cm de profundidade e uma área de cerca de 30 cm x 30 cm, onde as zonas de impacto devem possuir um afastamento mínimo de 2,5 cm, sendo esta medida a menor distância entre um ponto de impacto e uma aresta ou descontinuidade da estrutura, e entre ensaios de três centímetros;
3. De seguida, pressionar o veio de compressão do esclerómetro contra a superfície de betão a ensaiar, de forma a comprimir a mola existente no interior do aparelho. No momento em que o veio atinge o seu máximo (fim de curso), ocorre a sua libertação instantânea que choca com a sua extremidade interior sendo este mesmo choque transmitido à superfície a ensaiar. Após a transmissão do choque à superfície a ensaiar, esta reage originando um ressalto que é transmitido à massa móvel pelo veio, que ao deslocar-se, origina movimento num ponteiro visível no exterior do invólucro, registando o ponto máximo de ressalto da massa.

Após o impacto ter-se-á que registar o índice esclerométrico em cada local/ponto inicialmente estipulado. Quanto maior o valor de ressalto registado, maior o valor de dureza e compactação da superfície de betão. O valor de referência obtido através da escala do aparelho (índice esclerométrico) permite efetuar a avaliação do valor de resistência à compressão do betão, em função do ângulo entre superfície ensaiada e o eixo longitudinal do esclerómetro (Amaral, 2013; Medas, 2013).

Após a leitura e registo dos valores de índice esclerométrico dos pontos predefinidos para o ensaio, recorre-se a um ábaco de correlação, como o da Figura 4.4, para estimar a resistência à compressão do betão ensaiado. Devem-se considerar, no mínimo, nove leituras em cada área de ensaio, tendo em vista a coerência e homogeneização dos valores obtidos (Amaral, 2013).

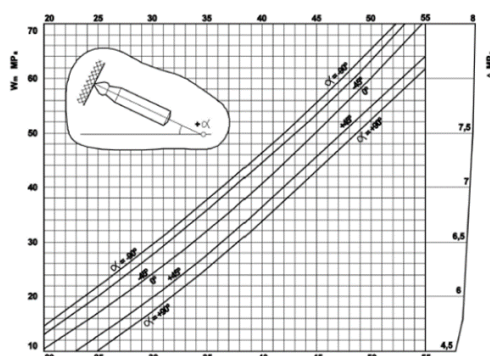


Figura 4.4 - Ábaco de correlação do martelo de Schmidt (Moura, 2012).

#### Fatores que influenciam o ensaio:

Existem vários fatores que podem condicionar ou influenciar o ensaio e os seus resultados. Entre alguns dos fatores podem estar a perda de aderência do betão, a presença de humidade ou a existência de descontinuidades, que podem afetar o valor do ressalto e consequentemente o valor do índice esclerométrico e em casos de degradação acentuada do betão pode conduzir a valores nulos do ressalto (Amaral, 2013; Sampaio, 2010). Existem ainda outros fatores importantes com implicações nos resultados do ensaio, tais como (Amaral, 2013; Sampaio, 2010):

- Irregularidades superficiais: é importante verificar se a superfície do betão se encontra lisa e sem irregularidades;
- Idade do betão: nas situações de testes em betão com menos de três dias ou com resistência à compressão menor do que 7 MPa, poderá ocorrer um erro introduzido elevado, devido à obtenção de um valor reduzido do índice esclerométrico;
- Teor de humidade: em condições saturadas mas com superfície seca, geralmente mostram índices esclerométrico mais baixos do que os dos provetes secos ao ar;
- Tipo de cimento: a resistência final do betão encontra-se dependente da natureza do cimento, logo quanto maior for a resistência da tipologia de cimento introduzida no betão, maior será o índice esclerométrico obtido do mesmo;

- Carbonatação do betão: a carbonatação do betão aumenta, efetivamente, a resistência mecânica do betão. Os valores para um betão carbonatado podem ser 50% superiores aos obtidos em um betão não carbonatado;
- Tipo de agregado: a presença de agregados grossos relativamente próximos da superfície pode intensificar os valores do índice esclerométrico. Para resistências de compressão iguais, o betão produzido com agregado granítico apresenta índices esclerométricos sensivelmente mais altos do que betões com agregado calcário.

Vantagens e desvantagens deste ensaio:

O ensaio esclerométrico apresenta como vantagens o facto de ser um ensaio simples e prático, não destrutivo, económico e com elevada rapidez de execução. No sentido inverso, como desvantagens, apresenta resultados dependentes da calibração do aparelho, os dados e os resultados obtidos são indicativos da resistência superficial à compressão e por vezes são de difícil interpretação e pouco fiáveis, havendo a necessidade de se realizarem outros ensaios complementares (Amaral, 2013).

#### 4.3.1.2. Ensaio de ultrassons

O ensaio de ultrassons caracteriza-se, segundo a norma NP EN 12504:4 (2012), por ser um método de determinação da velocidade de propagação de ondas longitudinais ultrassónicas no betão endurecido. Com este ensaio pode-se determinar a homogeneidade do betão, a espessura da camada de revestimento, eventuais presenças de vazios ou fendas (e sua profundidade) e as propriedades dinâmicas, as variações das propriedades ao longo do tempo e fazer uma avaliação qualitativa da resistência à compressão e do módulo de elasticidade de elementos ou provetes de betão. O ensaio é realizado com a emissão de vibrações acústicas da mesma natureza que o som, mas com uma frequência superior (acima de 20 kHz), que atravessam os materiais (Gonçalves, 2010). Desta forma, caso haja o conhecimento da densidade do material, assim como da respetiva velocidade de propagação das ondas, após a realização do ensaio ultrassons, poder-se-á estimar as propriedades elásticas do material analisado (Amaral, 2013; Sampaio, 2010).

Procedimento de utilização:

Para se realizar o ensaio de ultrassons de acordo com a norma NP EN 12504:4 (2012) e ilustrados na Figura 4.5, são necessários os seguintes elementos: um par de transdutores, um gerador de ondas ultrassónicas, gel para transdutores (gel, vaselina, sabão líquido, etc.) e um corpo de prova para calibração do aparelho (Galvão, 2009).



Figura 4.5 - Conjunto de elementos indispensáveis à realização do ensaio de ultrassons (Amaral, 2013).

Antes de se iniciar o ensaio é necessário proceder à calibração do aparelho utilizando uma barra de liga em que o tempo de propagação é conhecido. Esta operação consiste em fazer coincidir a leitura do mostrador digital com o valor de referência para a barra padrão, através do botão de ajuste do aparelho (Amaral, 2013; Galvão, 2009). A Figura 4.6 reproduz uma demonstração do procedimento de calibração do aparelho de ultrassons.

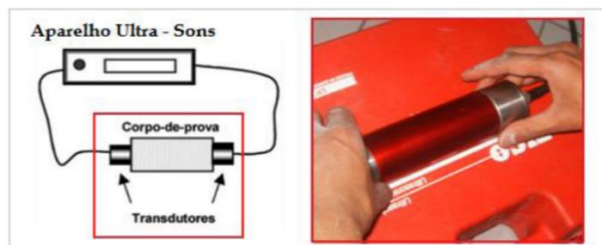


Figura 4.6 - Representação do procedimento de calibração do aparelho de ultrassons (Galvão, 2009).

O ensaio propriamente dito consiste na colocação de dois transdutores, com diferentes funções, em contacto com a superfície do elemento a analisar. Um dos transdutores funciona como transmissor, emitindo um impulso ultrassónico que atravessa o betão, que é recebido pelo segundo transdutor, que funciona como recetor (Amaral, 2013; Galvão, 2009). Os transdutores são ligados a um circuito eletrónico, que recebe um estímulo para oscilar mecanicamente, pois o circuito eletrónico emite pequenos impulsos elétricos ao transdutor excitando-o na sua frequência natural (Galvão, 2009; Sampaio, 2010). Esta vibração gera os impulsos, transformados em ondas de energia mecânica pelo transdutor-transmissor, que deve estar em contacto com a superfície do betão. Um transdutor recetor similar é conectado à superfície ensaiada a uma distância pré-conhecida do transdutor-emissor e a energia mecânica é novamente convertida em impulsos elétricos da mesma frequência (Galvão, 2009; Sampaio, 2010). O tempo gasto neste percurso é medido e fornecido eletronicamente pela unidade de medida central. Desta forma, é possível calcular a velocidade de propagação da onda elástica (Gonçalves, 2010).

A distância mínima entre transdutores, segundo a norma NP EN 12504:4 (2012), depende da dimensão máxima do agregado do betão a ensaiar, como poder-se-á observar na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Relação entre a máxima dimensão de agregado do betão a ensaiar e o comprimento de percurso de propagação de onda adotado no ensaio de ultrassons (adaptado de NP EN 12504, 2012).

Máxima dimensão de agregado do betão a ensaiar	Distância mínima entre Transdutores
$\varnothing \leq 20 \text{ mm}$	Percurso mínimo de 100 mm
$20 \text{ mm} < \varnothing < 40 \text{ mm}$	Percurso mínimo de 150 mm

Em relação à posição dos transdutores para a medição do tempo de propagação das ondas ultrassónicas, pode ser efetuada de três modos. Desta forma, é possível realizar medições de velocidade de ultrassons colocando dois transdutores em faces opostas (transmissão direta), ou em faces adjacentes (transmissão semi - direta) ou na mesma face (transmissão indireta ou transmissão superficial) da estrutura *in situ* de betão ou de um provete (Amaral, 2013; Galvão, 2009; Sampaio, 2010).

O método direto permite obter resultados com maior rigor e certeza devido à máxima energia do impulso ser transmitida segundo a direção normal ao emissor possibilitando a medição da distância de percurso da onda com maior precisão, sendo por isso o mais adequado. Neste método, os transdutores colocam-se frente-a-frente, em faces opostas (Figura 4.7(a)), sendo utilizado na avaliação das características de resistência mecânica e homogeneidade, detecção de descontinuidades no betão e obtenção do módulo de elasticidade dinâmico (Amaral, 2013; Galvão, 2009; Sampaio, 2010).

No método semi - indireto os transdutores localizam-se em faces perpendiculares do objeto (Figura 4.7(b)). Este método é útil em situações que se pretenda evitar regiões de armadura, como cantos de pilares e vigas. Segundo Sampaio (2010), este método acaba por fornecer o mesmo tipo de informação que o método direto, porém dever-se-á ter o cuidado de não se afastar demasiado os transdutores, a fim de se evitar a diminuição do impulso transmitido.

Segundo a norma NP EN 12504:4 (2012), o posicionamento por transmissão indireta é o mais sensível dos três métodos possíveis, o qual deverá ser utilizado, apenas, quando só uma das faces do betão está acessível (como é o exemplo de lajes, pavimentos de betão e de barragens) ou quando se tem interesse na qualidade da superfície do betão relativamente à qualidade global.

No método indireto os transdutores colocam-se na mesma face (Figura 4.7(c)), proporcionando-se o método menos satisfatório, uma vez que a amplitude do sinal pode ser inferior a 3% em relação ao método direto, propiciando desta forma a origem de erros na leitura de valores obtidos (Amaral, 2013). Outra particularidade do método indireto é a necessidade de se realizar um procedimento especial para determinar a velocidade de impulso, visto que o comprimento de propagação do impulso é desconhecido (Gonçalves, 2010). No método indireto, verifica-se uma maior incerteza nos resultados na medida em que a velocidade obtida é uma velocidade aparente, pois o comprimento do percurso das ondas não é medido com tanta precisão, adotando-se para tal a distância entre os transdutores (Gonçalves, 2010).

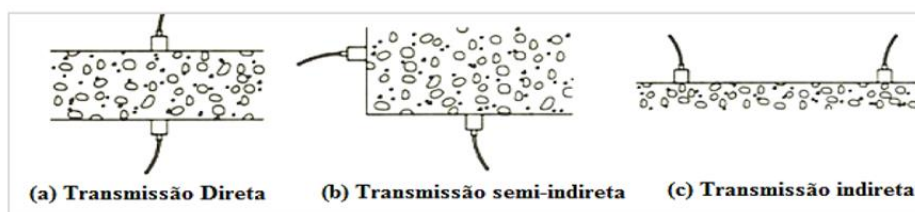


Figura 4.7 - Representação dos três métodos de medição de tempo de propagação das ondas ultrassônicas obtidas através do ensaio de ultrassons (Gonçalves, 2010).

#### Fatores que influenciam o ensaio:

Uma vez que as ondas se propagam por vibração das partículas sólidas, a velocidade de propagação depende principalmente da constituição do material analisado (Galvão, 2009). O ensaio de ultrassons é influenciado por diversos fatores devido às características do betão, da superfície do mesmo, das condições de utilização e do uso correto dos procedimentos de ensaio.

A influência de diversos fatores nos resultados pode dificultar a sua interpretação, impedindo estabelecer relações inequívocas entre variáveis (Gonçalves, 2010). Assim sendo, os fatores que influenciam os resultados do ensaio de ultrassons são os seguintes:

- Tipo e dimensão do agregado: A relação entre a velocidade de propagação das ondas ultrassónicas e a resistência à compressão varia com as características do agregado (Sampaio, 2010);
- Teor de humidade: Quanto maior for o teor de água no betão, maior será a velocidade de propagação de ultrassons (Amaral, 2013; Galvão, 2009);
- Temperatura do betão: A velocidade de propagação de ultrassons aumenta face a temperaturas inferiores a 10° C e diminui para temperaturas superiores a 30° C (Galvão, 2009);
- Comprimento do percurso: O comprimento do percurso efetuado pelo impulso ultrassónico deve ser suficientemente longo para não ser significativamente influenciado pela natureza heterogénea do betão (Sampaio, 2010). No que diz respeito à distância máxima, encontra-se relacionada apenas com a capacidade do equipamento de ensaio em utilização, contudo para se evitar reduções de velocidade associadas à propagação de ondas em elementos de betão, o comprimento de percurso deverá compreender-se até aos 3 metros (Amaral, 2013);
- Razão água-cimento: O aumento da razão a/c diminui a velocidade de impulso devido à diminuição da densidade e das resistências à compressão e à flexão (Sampaio, 2010);
- Aditivos: Os aditivos utilizados no fabrico do betão influenciam a velocidade de impulso aproximadamente da mesma forma que o teor de humidade (Sampaio, 2010);
- Grau de compactação: A densidade do betão diminui quando a compactação é inadequada, diminuindo a velocidade de impulso (Sampaio, 2010).

O ensaio de ultrassons é particularmente sensível à presença de fendas perpendiculares à propagação das vibrações, com um significativo decréscimo de velocidade de propagação, pelo que é utilizado na sua deteção, através do método indireto (Galvão, 2009; Gonçalves, 2010).

Outro fator que influencia os valores da velocidade de propagação de ondas em betão armado é a presença de armaduras que afeta significativamente a velocidade de propagação das ondas, uma vez que estas se propagam mais rapidamente nos metais do que no betão (Galvão, 2009). Como tal, a norma NP EN 12504-4 (2012) recomenda, que se evite analisar zonas com armaduras, em especial se estas forem paralelas à direção de propagação das ondas.

Os resultados obtidos são apresentados em tabelas, distinguindo-os em função do método utilizado, devendo na mesma linha ser apresentados o valor médio das leituras, o valor do desvio-padrão e o valor do coeficiente de variação (Amaral, 2013).

Nas transmissões direta e semi-direta, a velocidade de propagação dos ultrassons é calculada pela seguinte fórmula:

$$V = \frac{L}{T} \quad \text{Equação 4.1}$$

Em que:

- V é a velocidade de propagação dos ultrassons, em km/s;
- L é o comprimento do percurso, em mm;
- T é o tempo que os ultrassons levam a atravessar o comprimento de percurso, em  $\mu\text{s}$ .

O resultado da velocidade de propagação dos ultrassons deve ser expresso com aproximação ao 0,01 km/s (Albergaria, 2013).

No caso da transmissão indireta há alguma incerteza quanto ao exato comprimento do percurso da transmissão devido à dimensão significativa das áreas de contacto entre os transdutores e o betão. Assim sendo, e tendo em conta a norma NP EN 12504:4 (2012) será preferível realizar uma série de medições com os transdutores a diferentes distâncias para minimizar incertezas. Para tal, o transdutor transmissor deve ficar em contacto com o betão num ponto fixo e o transdutor-recetor deve ser colocado em pontos ao longo duma linha traçada na superfície do betão distantes do ponto fixo de sucessivos incrementos  $x_n$  e medidos os respetivos tempos de transmissão. Posteriormente dever-se-á traçar um gráfico, tal como o da Figura 4.8, mostrando a relação entre os tempos de transmissão  $t$  e as distâncias  $x$  entre os transdutores.



Figura 4.8 - Gráfico de obtenção da velocidade média da onda através do método indireto (Amaral, 2013).

Caso se evidencie uma descontinuidade, relativamente aos pontos medidos, poderá estar associada à presença de fissuras na superfície ou à qualidade reduzida da camada superficial do betão. Como tal, nestas condições os valores da velocidade de propagação de ondas não são fiáveis (Amaral, 2013). No seguimento da investigação nesta área estabeleceram-se valores de velocidade de propagação de impulso ultrassónico como indicador de qualidade do betão saturado, como se pode ver na Tabela 4.3 (Sampaio, 2010).

Tabela 4.3 - Relação entre a velocidade de impulso e a qualidade do betão (adaptado de Sampaio, 2010).

Velocidade de Impulso (m/s)	Qualidade do Betão
> 4570	Muito Boa
3660 a 4570	Boa
3050 a 3660	Questionável
2130 a 3050	Baixa
<2130	Muito Baixa

Vantagens e desvantagens do ensaio:

O ensaio de ultrassons apresenta como vantagens o facto de ser um ensaio simples, prático e direto, é o único ensaio verdadeiramente não-destrutivo, de elevada rapidez de execução e é realizado com o recurso a um aparelho portátil e fácil de utilizar (Amaral, 2013).

Em relação às desvantagens, é um ensaio difícil de definir corretamente a sua exatidão, os resultados estão dependentes da calibração do aparelho e são de obtenção complexa através da via indireta e podem também surgir dificuldades na interpretação dos resultados que podem ser pouco fiáveis devido às condições onde o ensaio é realizado (Amaral, 2013).

**4.3.1.3. Ensaio de termografia**

O ensaio de termografia é um ensaio não destrutivo que permite detetar heterogeneidades existentes em elementos construtivos, não visíveis a olho nu (Amaral, 2013; Cóias, 2006).

A termografia baseia-se no princípio segundo o qual todos os corpos emitem radiação térmica, sendo possível, utilizando aparelhagem adequada, visualizar e registar diferentes graus de emissão na faixa do infravermelho, ilustrada na Figura 4.9 (Albergaria, 2013; Ferreira, 2010).

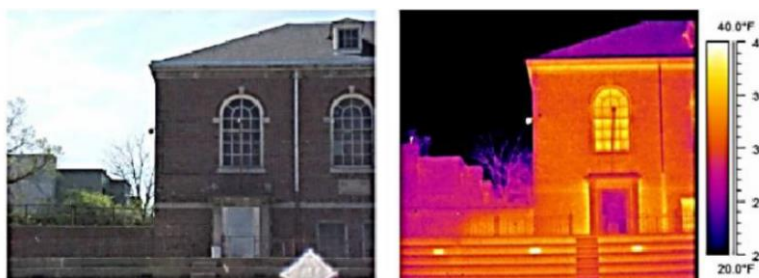


Figura 4.9 - Representação de um ensaio termográfico (Amaral, 2013).

Este ensaio tem por base dois grandes fundamentos.

O primeiro é o facto de todos os corpos emitirem uma radiação térmica que depende da sua temperatura. Os materiais que compõem uma estrutura comportam-se de maneira diferente, devido a sua condutibilidade térmica e calor específico. O que origina diferenças de temperatura no mesmo elemento quando submetidos às mesmas solicitações térmicas.

O segundo fundamento é o facto da presença de ar no interior de um elemento de betão armado originar um decréscimo de condutibilidade térmica, alterando a temperatura na superfície do elemento (Cóias, 2006; Nicholas, 2010). Este facto é possível de ser verificado na Tabela 4.4 onde se pode constatar que o ar possui uma condutibilidade térmica consideravelmente inferior à do betão e do aço.

Tabela 4.4 - Condutibilidade térmica dos materiais (adaptado de Albergaria, 2013).

Material	Condutibilidade térmica (J/s.m.°C)
Aço	46
Gelo	1,7
Betão	0,8
Ar	0,024

A presença de ar forma uma barreira local que interrompe o fluxo de calor, alterando a temperatura à superfície, como se pode ver na Figura 4.10. Quanto mais profunda se encontrar a anomalia mais tempo levará o elemento a alterar a sua temperatura à superfície (Nicholas, 2010).

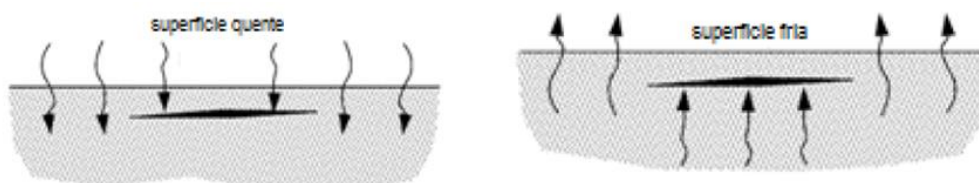


Figura 4.10 - Representação esquemática da barreira devido a presença de ar (Moura, 2012).

A informação recolhida é processada e analisada através de um programa informático apropriado, a partir do qual é produzido um relatório termográfico, traduzido pela exposição de informações associadas às temperaturas superficiais, à análise da área em estudo, assim como os termogramas originais a preto e branco ou a cores (Amaral, 2013).

Segundo Cóias (2006), o ensaio termográfico pertence a um grupo de técnicas onde se pode observar o interior de componentes ou elementos de construção por processos inteiramente não destrutivos, sendo possível fazer o levantamento das características geométricas e das anomalias existentes no interior dos elementos.

Assim, a termografia poderá ser utilizada em vários campos do desempenho construtivo e desempenho de componentes e serviços, tais como (Pereira & Paiva, 2006):

- Detecção de defeitos de isolamento, existência de humidades ou problemas escondidos, como fugas em canalizações inseridas nas paredes;
- Exame de sistemas de aquecimento;
- Manutenção preventiva.

Na preparação do ensaio a parede ou outro elemento a observar termograficamente são previamente limpos e aquecidos, utilizando projetores de luz com potência adequada, ou através da radiação solar no caso de elementos exteriores.

Para a realização do ensaio deverá ser utilizada uma câmara termográfica sensível à radiação infravermelha, onde ao nível da superfície se detetam diferenças de temperaturas da ordem da fração do grau centígrado (Albergaria, 2013; Amaral, 2013).

#### Vantagens e desvantagens do ensaio:

As principais vantagens deste ensaio são a facilidade de transporte do equipamento e a rapidez na obtenção dos resultados, assim como a respetiva capacidade de analisar diversas áreas sem recurso a qualquer contacto com a superfície (Amaral, 2013; Oliveira, 2003).

Como desvantagens, há o elevado valor de aquisição da câmara termográfica, assim como a necessidade de as superfícies a analisar serem pré-aquecidas, para que haja a discrepância de temperaturas superficiais no local a ensaiar. A simplicidade aparente da técnica de infravermelhos

pode conduzir a uma má interpretação dos resultados no caso de certas preocupações e procedimentos não forem tidos em conta antes e durante a realização de ensaios, tais como (Pereira & Paiva, 2006):

- As condições térmicas do interior e exterior do edifício antes e durante o ensaio;
- A medição de todos os parâmetros necessários para a análise térmica (emissividade, temperatura do ar, humidade relativa, distancia ao objeto, definições da máquina termográfica, entre outros);
- Evitar a influência incómoda, de sombras, reflexos quentes ou frios e diferentes superfícies de acabamento.

As principais razões que levam à elaboração de uma pesquisa termográfica associam-se à melhoria do desempenho e avaliação da correta aplicação de materiais, à investigação e prevenção. Todavia, a aplicação deste ensaio tem ganho cada vez mais relevância em diversos elementos construtivos, essencialmente, na avaliação do estado de degradação de revestimentos (Amaral, 2013; Pereira & Paiva, 2006).

#### 4.3.1.4. Ensaio de deteção das armaduras, seu diâmetro e recobrimento

A deteção das armaduras e avaliação do seu diâmetro e recobrimento é um método de inspeção e ensaio complementar aos outros ensaios. Antes de iniciar o planeamento dos ensaios considerados necessários ou mesmo uma manutenção a uma estrutura de betão, é importante saber a localização, orientação e profundidade das armaduras (Cóias, 2006; Moura, 2012).

O equipamento de deteção de armaduras é um aparelho de pequenas dimensões, portátil e alimentado por pilhas, sendo constituído por uma unidade de leitura, dois detetores e dois espaçadores, idêntico ao ilustrado na Figura 4.11 (FerroScan PS 200) (Gouveia, 2010).



Figura 4.11 - Exemplo de um equipamento de deteção de armaduras – FerroScan PS 200 (adaptado de Albergaria, 2013).

Os parâmetros de medição deste tipo de equipamento variam em função do varão e do tamanho do detetor, existindo a possibilidade de efetuar medições com FerroScan PS 200 até 180 mm de profundidade (com varão nervurado de 36 mm), com uma precisão de  $\pm 3$  mm (Gouveia, 2010).

Numa primeira fase, recomenda-se a detetar a armadura num local favorável, de modo a identificar o tipo de armadura servindo de acerto à calibração do aparelho. Na medição do

recobrimento e após calibragem do aparelho, seleciona-se a dimensão e o tipo de aço dos varões cujo recobrimento pretendemos controlar com base no projeto. O microprocessador do aparelho permite a determinação automática do diâmetro dos varões, com base em duas leituras efetuadas num mesmo local através de um espaçador apropriado. Para que se obtenham resultados precisos é necessário alguns cuidados especiais, pelo que quando o conhecimento do diâmetro do varão se trata de um dado importante, nomeadamente para cálculos estruturais torna-se indispensável efetuar a exposição do varão, de modo a efetuar-se a confirmação (Gouveia, 2010; Medas, 2013).

#### **4.3.2. Ensaios destrutivos**

Os ensaios destrutivos têm como objetivo avaliar as propriedades mecânicas do betão e envolvem, geralmente, a destruição do provete. Estes ensaios são frequentemente realizados sobre provetes normalizados ou sobre carotes retiradas da estrutura. As carotes, ou tarolos, são levadas para laboratório e submetidas a ensaios, destrutivos ou não-destrutivos que permitem obter as características pretendidas. Na maioria das análises ou diagnósticos para avaliação da capacidade estrutural, a extração de carotes é inevitável e frequentemente fundamental. As carotes são cilindros extraídos por perfuração com uma coroa diamantada.

Quer a estrutura a avaliar seja nova, quer seja antiga, a extração de carotes para ensaios de caracterização mecânica do betão, envolve custos que podem condicionar o número de carotes a extrair, o que em uma estrutura de grandes dimensões pode resultar numa avaliação incorreta. Nesta situação, os ensaios não-destrutivos podem ser utilizados, como preliminares a um posterior caroteamento mais criterioso, para eleger as zonas mais representativas da estrutura (Sampaio, 2010).

Estas técnicas de ensaio podem ser utilizadas para confirmar um diagnóstico sobre o tipo de deterioração, para quantificar a contaminação e os danos, e para determinar as propriedades mecânicas do betão e das armaduras necessárias muitas vezes para determinar as consequências estruturais da deterioração.

##### **4.3.2.1. Ensaio de Arrancamento (Pull-Out)**

O ensaio de arrancamento ou Pull-Out como também é conhecido possibilita uma avaliação da capacidade de resistência à tração, uniformidade do betão, deformabilidade e qualidade, existindo diferentes métodos. Possibilita também estimar a resistência à compressão do betão, convertendo a força, através de correlações previamente estabelecidas.

O método do arrancamento (Pull – Out) analisa a força necessária para arrancar um disco metálico inserido no betão a uma dada profundidade, onde a formação de um anel de reação à superfície do betão define a superfície de rotura.

Neste tipo de ensaio existem duas categorias (Pereira, 1999): os ensaios planeados antes da betonagem (Lock-Test) e os ensaios planeados após a betonagem (Capo-Test).

- Lock-Test

O ensaio Lock-Test foi desenvolvido na década de 60 do século XX por Peter Krierkegaard – Hansen, e estabelece hoje em dia a principal referência neste tipo de ensaios.

Necessita que um conjunto seja normalmente fixo às cofragens antes da betonagem, ficando no interior do betão (Pereira, 1999). A Figura 4.12 ilustra o modo de funcionamento deste ensaio.

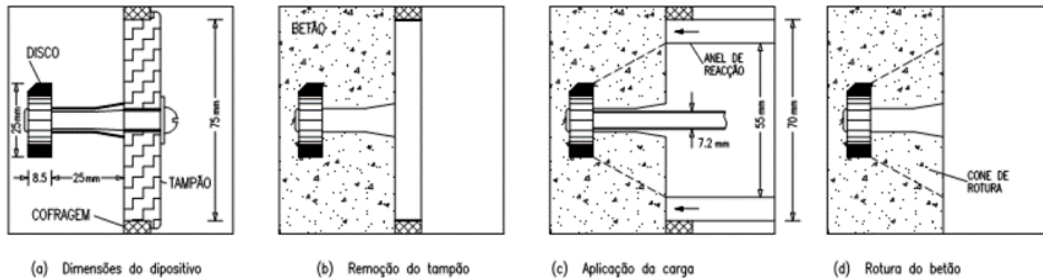


Figura 4.12 - Representação esquemática do ensaio de arrancamento - Lock-Test (adaptado de Pereira, 1999).

Este ensaio apresenta-se como uma alternativa à extração de carotes, possibilitando o controlo de qualidade e ajuda a avaliar o desenvolvimento da resistência do betão (através do conjunto previamente inserido na estrutura), possibilitando obter informações acerca da altura correta da descofragem e mesmo de aplicação de pré-esforço (Pereira, 1999).

- Capo-Test

O ensaio Capo-Test foi desenvolvido um pouco mais tarde que o Lock-Test, tendo surgido na década de 70, na Dinamarca. Ao contrário do Lock-Test, não necessita de um planeamento prévio, podendo ser executado após o endurecimento do betão (Pereira, 1999).

A realização deste ensaio, tal como se pode ver na Figura 4.13, consiste na extração de um anel que é expandido no interior de um furo feito no betão, sendo extremamente necessário saber-se a localização da armadura bem como efetuar-se a medição do recobrimento (Pereira, 1999).

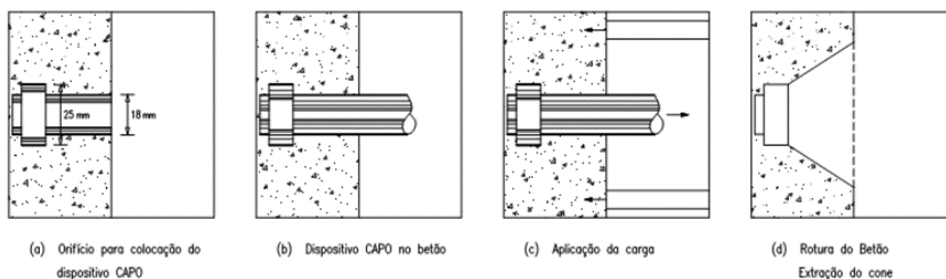


Figura 4.13 - Representação esquemática do ensaio de arrancamento - Capo-Test (adaptado de Pereira, 1999).

A força de arranque provoca o esmagamento entre o betão e o dispositivo de arranque, o que pressupõe que a tensão medida seja diretamente relacionada com a resistência à compressão.

O ensaio Capo-Test possibilita estimar a resistência de estruturas já existentes, podendo estas serem danificadas ou deterioradas e permite comprovar os dados obtidos através do outro método (Pereira, 1999).

Vantagens e desvantagens deste ensaio:

Os dois tipos de ensaios de arrancamento permitem avaliar a capacidade resistente à compressão do betão. Em ambos os ensaios é necessário verificar se a superfície do betão se encontra lisa e regular aquando do assentamento do anel, observando se o mesmo assenta em toda a sua superfície. Os resultados dos ensaios são influenciados pela dimensão e tipo de agregados, pela velocidade de aplicação da carga e ainda pelas dimensões do dispositivo de arranque (Pereira, 1999; Sampaio, 2010). O ensaio Capo-Test é o mais influenciado pela máxima dimensão do agregado, pelo facto de ser um ensaio de rotura localizado (Pereira, 1999; Sampaio, 2010).

**4.3.2.2. Ensaio de arrancamento por tração direta (Pull-Off)**

O ensaio de arrancamento por tração direta (Pull-Off) permite avaliar a resistência à tração do betão e a aderência entre o betão e outros materiais, através da força necessária para efetuar o arrancamento de um disco metálico colado no betão (Medas, 2013). O ensaio pode ser realizado sobre a superfície de uma estrutura de betão, em qualquer ponto acessível da mesma. O “pull-off” não é um método puramente não-destrutivo, já que é necessário proceder à reparação da zona ensaiada, sendo por isso muitas vezes denominado como um método semi-destrutivo (Medas, 2013).

Para a realização do ensaio procede-se à realização de um caroteamento na zona a ensaiar, com um diâmetro igual ao de uma peça metálica que irá ser colada com uma resina epoxídica. Deve-se garantir a perpendicularidade à superfície do material e uma profundidade suficiente para perfurar os diversos planos de ligação dos materiais e atingir o substrato de betão. De seguida procede-se à limpeza da superfície de betão que deve ficar isenta de água e humidade, podendo proceder-se a uma regularização da superfície com uma lixa grossa, removendo de seguida toda a poeira existente com recurso a acetona. Na fase seguinte, procede-se à colagem da peça metálica, também designada por pastilha e que tem geralmente entre 40 a 50 mm de diâmetro, com recurso a uma resina epoxídica (Medas, 2013; Sampaio, 2010).

Após a cura da resina, utiliza-se um aparelho idêntico ao da Figura 4.14 que efetua o arrancamento da pastilha e fornece o valor da tensão de tração exercida no arrancamento. Para o arrancamento, enrosca-se um parafuso na pastilha permitindo que o aparelho exerça sobre o conjunto (pastilha, resina e betão) uma força de tração. Deve garantir-se que a força de tração se distribui de forma uniforme e perpendicularmente na pastilha. Se isso não acontecer, os valores de “pull-off” serão menores do que os obtidos em boas condições de ensaio. As assimetrias na força de tração podem ser causadas na execução do pré-caroteamento ou aplicação da resina, mas também se o aparelho de ensaio não estiver nivelado. No sentido de minimizar esse efeito, alguns aparelhos fazem um auto-nivelamento relativamente à área a testar (Medas, 2013; Sampaio, 2010).

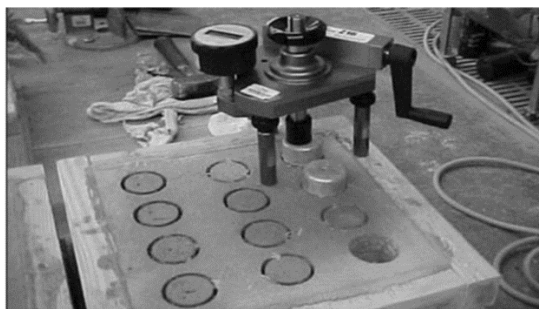


Figura 4.14 - Equipamento para o ensaio Pull-Off (Sampaio, 2010).

A tração é transmitida axialmente a uma peça metálica (pastilha) de ensaio colada previamente ao provete. O aumento gradual da força pode ser observado diretamente numa escala, sendo registado o momento em que ocorre o arrancamento do provete na secção mais frágil deste (Medas, 2013).

Deve caracterizar-se o modo de ruína ocorrido no arrancamento da pastilha para complementar a análise dos resultados obtidos. De uma forma geral, podem ocorrer dois modos de ruína: rotura que ocorre na superfície de interface resina-betão e rotura por corte do betão (Sampaio, 2010).

Quando ocorre a rotura na superfície da interface resina-betão (ruína pela resina), a pastilha apresenta vestígios de betão mas pouco significativos. Este tipo de rotura pode indicar uma cura da resina mal efetuada ou a existência de um betão bastante forte. Os valores associados a este tipo de ruína são considerados inválidos para efeitos de caracterização do betão. No segundo caso, quando ocorre a rotura por corte do betão (ruína pelo betão), observa-se na pastilha uma porção de betão com o formato da pastilha e com espessura variável, mas próxima do valor da profundidade do pré-caroteamento (Sampaio, 2010).

O valor obtido através do ensaio de “pull-off” resulta da força de arrancamento dividida pela área da pastilha e pode ser correlacionado com a resistência do betão.

É necessário respeitar o tempo necessário para a cura da resina. Este depende do tipo de resina utilizada e das condições de temperatura e humidade verificadas no local. Assim, o tempo que decorre desde o pré-caroteamento até ao arrancamento da pastilha e obtenção do valor do ensaio de “pull-off” pode variar, sendo geralmente maior ou igual a 48 horas (tempo de cura). A aplicação de primário é recomendada para aumentar a aderência da pastilha ao betão. Este produto deve ser aplicado antes do pré-caroteamento e também requer uma cura semelhante ao da resina, aumentando o tempo de espera (Juvandes, 1999).

Num estudo levado a cabo por Costa et al. (2005), apresenta-se a expressão da Equação 4.2 que permite estimar o valor da resistência à compressão do betão em cubos a partir do ensaio de “pull-off”:

$$f_{ctm,p} = 0,18(f_{cm,cubo})^{\frac{2}{3}} \quad \text{Equação 4.2}$$

Em que:

- $f_{ctm,p}$  – valor médio da resistência obtida no ensaio Pull-Off;
- $f_{cm,cubo}$  – resistência média do betão à compressão em cubos.

A obtenção de valores com recurso a esta equação foi adotada pelo British Standard Council e pelo Instituto Alemão de Tecnologia da Construção.

Os valores obtidos neste ensaio devem ser analisados criticamente, pois existem diversos fatores que podem influenciar o ensaio Pull-Off e conduzir a conclusões erradas. Segundo Juvandes (1999), os fatores que mais influenciam este tipo de ensaio são:

- Estado de deterioração do betão: a existência de micro-fendilhação reduz os valores do “pull-off”;
- Tipo de adesivo utilizado na colagem das pastilhas: o tipo de adesivo pode condicionar o modo de ruína, se esta se dá pelo betão, pelo adesivo ou por ambos;
- Tratamento das superfícies: em superfícies mais rugosas ou sem aplicações de qualquer primário ou argamassa de regularização, os valores de “pull-off” são bastante mais baixos do que os obtidos com superfícies mais regulares;
- Caroteamento: se o ensaio é efetuado com a realização de pré-caroteamento os valores do “pull-off” são inferiores aos obtidos sem pré-caroteamento;

Devido aos fatores descritos anteriormente e que tornam o ensaio muito suscetível a erros, é aconselhado realizar um número suficiente de ensaios que permita uma comparação dos resultados. Este é um ensaio vantajoso no sentido em que pode ser aplicado *in situ* e em estruturas pré-existentes, sendo um método particularmente útil quando se pretende avaliar a aderência entre novas camadas de betão ou materiais de reparação aplicados a betão previamente existente (Juvandes, 1999).

#### **4.3.2.3. Ensaio de determinação da profundidade da carbonatação**

A verificação e caracterização do estado de conservação do betão, em relação ao processo da carbonatação, pode ser realizada através da aplicação de uma solução de fenolftaleína (1% de Fenolftaleína + 70% de Álcool Etílico + 29% de Água Destilada) em furos ou orifícios previamente executados em uma estrutura de betão armado (Amaral, 2013; Medas, 2013).

Na escolha dos pontos a ensaiar existe a necessidade de salvaguardar a integridade das armaduras, efetuando a deteção das mesmas. A profundidade dos orifícios deverá ser superior em, pelo menos, 1 cm, ao recobrimento obtido com o detetor de armaduras. É impreterível a correta limpeza dos furos para garantia de isenção de resíduos, gorduras e/ou poeiras que poderão conduzir a uma adulteração de resultados (Amaral, 2013; Medas, 2013).

O reconhecimento da eventual carbonatação baseia-se na mudança de coloração tendo em conta os valores de pH do betão a analisar (após a aspensão da solução). Em circunstâncias de

valores entre 8 a 9 de pH (betão carbonatado) não ocorre mudança de coloração na superfície de betão em inspeção. Nas situações de valores de pH entre 12 a 13 (betão não carbonatado), surge uma coloração de carmim na superfície em análise. Porém, os valores de pH, em que se presencia a mudança de coloração (carmim-incolor) situam-se entre 8 a 10 pH (Amaral, 2013; Medas, 2013). A Figura 4.15 ilustra um exemplo de uma carote de betão com zonas afetadas pela carbonatação.

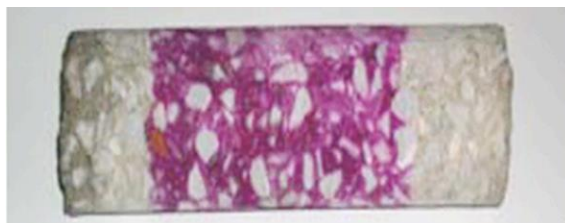
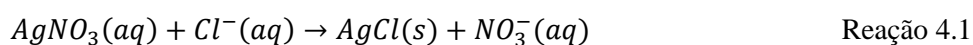


Figura 4.15 - Exemplo de carote de betão com zonas carbonatadas nas extremidades (adaptado de Cóias, 2006).

#### 4.3.2.4. Ensaio de determinação do teor de cloretos

Para além do efeito da carbonatação, também a presença de iões cloreto no betão provoca a deterioração eletroquímica das armaduras, tal como o aceleração do processo de corrosão das mesmas (Amaral, 2013; Amaro, 2011). Assim, é necessário determinar a concentração de iões cloreto na composição destes elementos construtivos. Para isso, pode-se recorrer a uma avaliação qualitativa da presença de iões cloreto através da realização da aspersão de uma solução de nitrato de prata ( $AgNO_3$ ) em furos previamente realizados na superfície do betão ou recolhendo o pó desses furos e fazendo o ensaio em laboratório (Amaral, 2013; Cóias, 2006).

No caso de se verificar a presença de iões cloreto na superfície em análise após a aplicação da solução de nitrato de prata, forma-se uma solução pastosa e branca (composto de cloreto de prata,  $AgCl$ ), a qual resulta da reação do nitrato de prata com os iões cloreto (Reação 4.1) (Amaral, 2013).



A realização deste ensaio implica a localização prévia das armaduras existentes no elemento de betão com recurso a um pacómetro. De seguida, e com recurso ao alicate de fixação procede-se ao posicionamento da concha de recolha de pó através de uma bucha de fixação. Inicia-se a perfuração do elemento em três locais, de modo a ensaiar a profundidade na qual se pretende estudar e analisar o teor de cloretos. A fim de se garantir a homogeneidade das amostras de pó serão executados furos suficientes (pelo menos 6 furos) para se obterem a cada profundidade pelo menos 20g de pó. Dever-se utilizar um saco plástico, hermeticamente fechado, para recolha do pó (Amaral, 2013; Medas, 2013). Caso se pretenda efetuar um perfil do teor de cloretos, é necessários proceder à recolha de amostras a três níveis, ou seja, perto da superfície, junto das armaduras e 2 a 3 cm abaixo das armaduras (Amaral, 2013; Medas, 2013).

Na Figura 4.16 estão ilustrados dois casos em que o ensaio para verificação qualitativa da existência de cloretos se revelou positiva. Em ambos os casos é possível verificar a existência da solução pastosa branca ou de um precipitado branco revelando a presença dos íões cloreto.

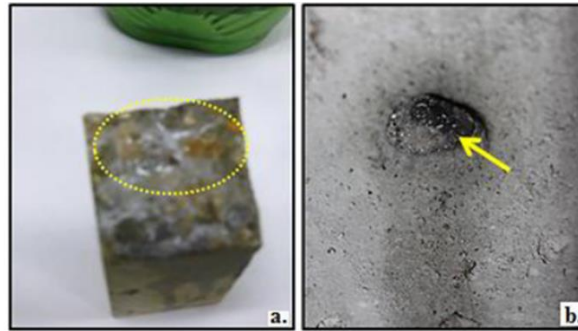


Figura 4.16 - Representação da solução branca pastosa num provete de betão (a) e de um precipitado branco na superfície de betão (b) (Amaral, 2013).

Este ensaio é apenas qualitativo embora existam ensaios quantitativos que indicam com algum rigor o teor total, ou mais precisamente, o teor solúvel em ácido, de cloretos existentes no betão (Amaral, 2013; Córias, 2006).



## 5. A NORMA NP EN 1504

### 5.1. Introdução

Até à década de 80 do século XX existia uma escassez de disposições normativas específicas para a reabilitação de edifícios, mesmo nos países mais desenvolvidos neste tema. Surgiu assim a necessidade de existir normalização com o objetivo de organizar e apresentar metodologias de proteção, reabilitação ou reforço de estruturas de betão, assim como a forma de desenvolver o diagnóstico das patologias, a seleção apropriada de técnicas, produtos e sistemas de forma a escolher a melhor solução para cada anomalia (Sousa, 2011).

Assim, durante o período referido anteriormente, o Comité Europeu de Normalização (CEN) deu início à preparação de um conjunto de normas referentes à reparação e proteção de estruturas de betão. Mais tarde surgiu a Norma NP EN 1504 sob o título de “Produtos e Sistemas para a Proteção e Reparação de Estruturas de Betão” que reúne toda a informação sobre produtos e sistemas para manutenção e proteção, reabilitação e reforço de estruturas de betão (Silva, 2008; Sousa, 2011).

A referida norma está dividida em dez partes que têm em conta seis usos pretendidos para os produtos: proteção superficial, reparação estrutural e não estrutural, reforço por colagem estrutural, injeção de betão, injeção para ancoragem e enchimento e prevenção da corrosão. Para além disso também contém os aspetos comuns a esses usos considerados em conjunto.

### 5.2. Estrutura da norma

Tal como referido anteriormente, a norma está dividida em dez partes, em que a primeira contém as definições e objetivos da norma. Nas partes 2 a 7 são referidos os sistemas e produtos que permitem realizar as operações de reabilitação e/ou reforço, com o estabelecimento de valores para as propriedades que estes devem apresentar em função da aplicação. As partes 8 e 10 tratam respetivamente, da avaliação da conformidade e da aplicação e controlo da qualidade. A parte 9 apresenta os princípios gerais para a utilização de produtos e sistemas.

De uma forma resumida, cada parte da norma contém os seguintes aspetos:

A parte 1 da NP EN 1504 (2006) classifica e define os tipos de produtos e sistemas para reparação, manutenção, proteção ou reforço de estruturas de betão. Esta parte da norma contém ainda a descrição dos principais tipos químicos e constituintes de produtos e sistemas para proteção e reparação do betão.

A parte 2 da NP EN 1504 (2006) especifica os requisitos para a identificação, comportamento (incluindo durabilidade) e segurança de produtos e sistemas para a proteção superficial do betão, para aumentar a durabilidade de estruturas de betão e de betão armado, em estruturas novas ou em trabalhos de manutenção e reparação.

A parte 3 da NP EN 1504 (2006) especifica os requisitos de comportamento (incluindo a durabilidade) e segurança dos produtos e sistemas para a reparação estrutural e não estrutural.

A parte 4 da NP EN 1504 (2006) especifica os requisitos e critérios de conformidade para a identificação, comportamento (incluindo aspetos de durabilidade) e segurança de produtos e sistemas para colagem estrutural de materiais de construção a estruturas de betão.

A parte 5 da NP EN 1504 (2006) especifica os requisitos para identificação, comportamento (incluindo aspetos de durabilidade) e segurança de produtos de preenchimento de fendas e cavidades internas no betão, por injeção ou por gravidade, em trabalhos de proteção ou reforço de estruturas.

A parte 6 da NP EN 1504 (2008) especifica os requisitos para identificação, comportamento (incluindo aspetos de durabilidade) e segurança de produtos de injeção de caldas em ancoragens, em trabalhos de proteção ou de reforço.

A parte 7 da NP EN 1504 (2008) especifica os requisitos para identificação, comportamento (incluindo aspetos de durabilidade) e segurança de produtos e sistemas de prevenção da corrosão das armaduras, em particular por realcalinização e extração eletroquímica de cloretos.

A parte 8 da NP EN 1504 (2006) especifica os procedimentos para a amostragem, verificação da conformidade, marcação de produtos e identificação de sistemas para a proteção e reparação de estruturas, no âmbito da série de normas NP EN 1504.

A parte 9 da NP EN 1504 (2009) define os princípios para a proteção e reparação de estruturas de betão, que tenham sofrido ou possam vir a sofrer danos ou deteriorações, e indica regras para a seleção adequada dos produtos e sistemas.

Esta norma identifica as etapas principais de um processo de reparação, desde a identificação das causas da deterioração, seleção dos princípios e métodos adequados para a proteção e reparação, definição das propriedades dos produtos e sistemas e especificação dos requisitos de manutenção após os trabalhos de proteção e reparação.

A parte 10 da NP EN 1504 (2008) apresenta os requisitos para armazenamento, preparação e aplicação de produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão, incluindo o controlo de qualidade, manutenção, saúde e segurança.

São definidos os seguintes requisitos:

- Verificação da compatibilidade do betão e armaduras originais com os materiais de reparação, bem como a compatibilidade entre materiais de sistemas de reparação diferentes;
- Verificação das condições da base de aplicação, tais como: rugosidade, fendilhação, resistência à tração e à compressão, existência e profundidade de penetração de cloretos ou outros contaminantes, profundidade de carbonatação, teor em humidade, temperatura e grau de corrosão das armaduras;

- Verificação das condições de armazenamento e de aplicação dos materiais em termos de temperatura e humidade, proteção do vento e da chuva e outras de carácter temporário.

Finalmente, esta norma estabelece o requisito da elaboração de um manual de qualidade, para todos os trabalhos de intervenção numa estrutura, baseado no modelo da série de normas EN ISO 9000(2008), que inclua a definição dos intervalos de inspeção para verificação da eficácia das técnicas utilizadas e de necessidades futuras de manutenção (Sousa, 2011).

Para que os produtos possam ser utilizados em projetos de reabilitação devem estar devidamente certificados e com marcação CE. Desta forma, a norma faz também referência a outras normas que deverão ser aplicadas para que todos os produtos e sistemas sejam ensaiados da mesma forma a fim de obterem a marcação. Na Figura 5.1 demonstra-se a ligação das diferentes partes da norma em estudo e com a normalização externa (Sousa, 2011).

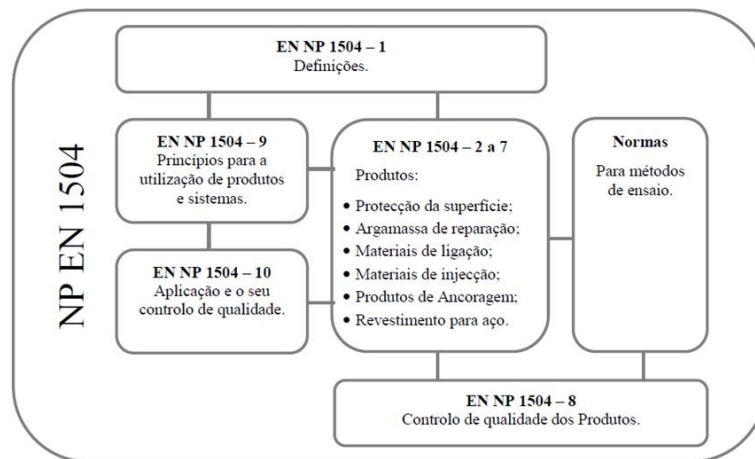


Figura 5.1 - Ligação entre as diferentes partes da norma (Sousa, 2011).

### 5.3. Aplicabilidade da norma

A norma EN 1504-9 (2009) define cinco fases distintas para uma obra de reparação de uma estrutura de betão armado. O processo é iniciado com uma fase de diagnóstico, constituída por duas tarefas com o objetivo de avaliar o estado da estrutura e identificar as patologias existentes. A fase seguinte denomina-se de fase deliberativa onde são decididas as medidas a tomar e os princípios e métodos a adotar. Segue-se a fase de dimensionamento da solução adotada, baseada na decisão tomada na fase anterior, que dará lugar à fase de execução da solução encontrada. A última fase é a de inspeção, monitorização e manutenção que pode ser facultativa, embora seja relevante em estruturas especiais e com elevada importância.

Na Figura 5.2 estão representadas as fases anteriormente enunciadas e os objetivos principais de cada uma dessas fases.

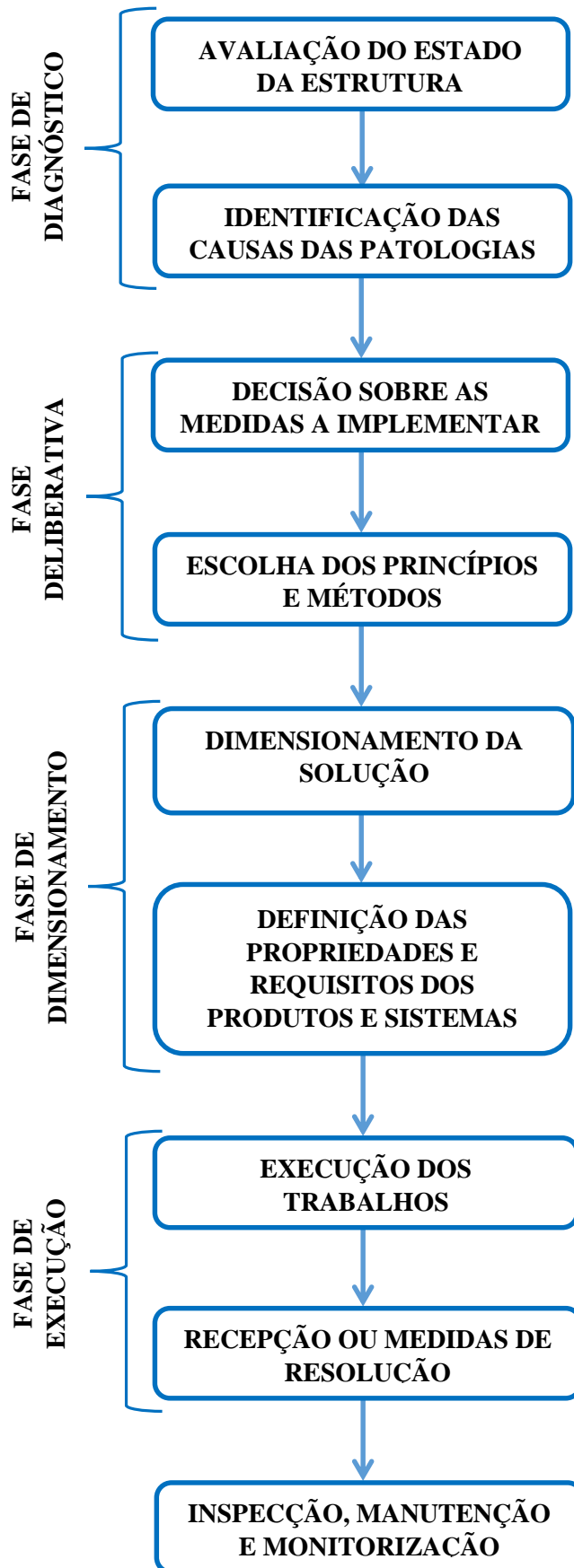


Figura 5.2 - Etapas principais de um processo de reparação de uma estrutura de betão (adaptado de Sousa, 2011).

### Fase de diagnóstico

A fase de diagnóstico é o ponto de partida do processo de reabilitação de uma estrutura de betão. É nesta fase que deve ser recolhida toda a informação sobre a estrutura, como por exemplo, conhecer o seu historial, a sua documentação e projeto original, materiais utilizados e suas propriedades, condições de carregamento, exposição ambiental, obras anteriores, nível de segurança existente e os requisitos para utilizações futuras, principalmente quando existe uma atribuição de novo uso ao espaço existente. No caso de não existir qualquer tipo de documentação e informação sobre a estrutura, o técnico poderá apenas fazer uma análise baseada em avaliações e ensaios realizados no local (Silva, 2008; Sousa, 2011).

A Figura 5.3 resume as tarefas principais da fase de diagnóstico.

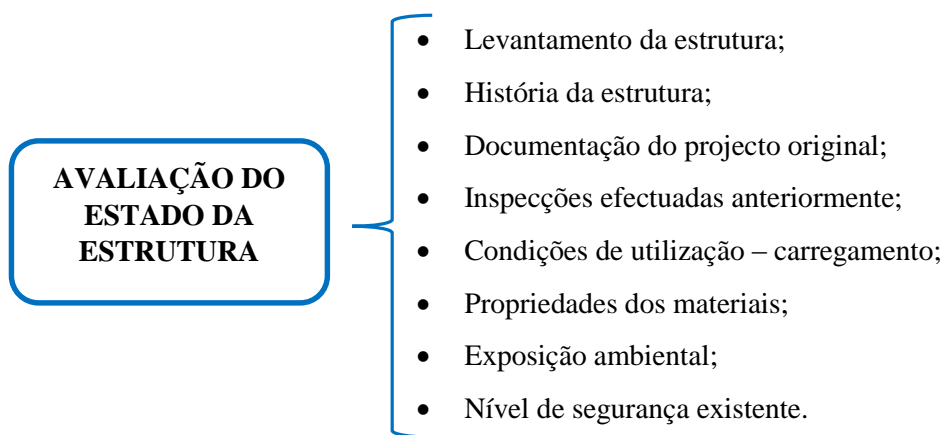


Figura 5.3 - Tarefas para avaliação do estado da estrutura (adaptado de Silva, 2008).

A vida útil de projeto para a estrutura de betão após intervenção de reparação, é um elemento chave na escolha de uma estratégia de gestão adequada.

Segundo a norma, existem pelo menos duas oportunidades de intervenção na estrutura para atingir a mesma vida útil de projeto, como se pode verificar na Figura 5.4.

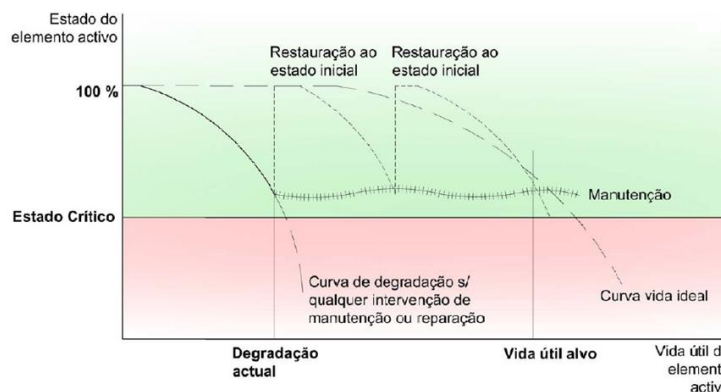


Figura 5.4 - Opções de intervenção numa estrutura de betão (adaptado de NP EN 1504-9, 2009).

Nesta fase também se recolhe toda a informação sobre as patologias existentes no betão e nas armaduras, identificando as suas causas. As patologias no betão poderão ter causas

mecânicas, físicas ou químicas. Nas armaduras o problema principal é a corrosão que pode surgir, por exemplo, devido à carbonatação do betão e ao ataque dos cloretos (Silva, 2008; Sousa, 2011).

Por vezes as patologias resultam da deficiente execução da obra (erros na fase de dimensionamento, erro construtivo ou ausência de especificação). Só depois de se perceber a origem das patologias é que se poderão definir as medidas a aplicar (Silva, 2008). As causas das patologias no betão armado são, maioritariamente, as constantes da Figura 5.5.

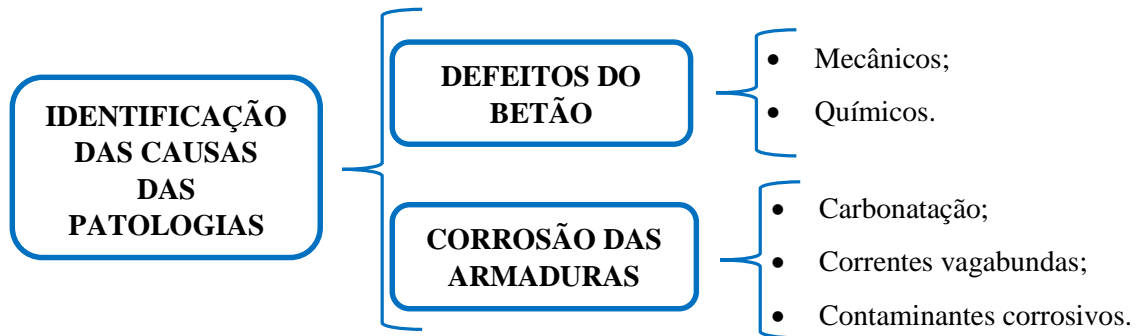


Figura 5.5 - Identificação das causas das patologias no betão armado (adaptado de Silva, 2008).

### Fase deliberativa

As medidas a tomar dependem de vários fatores preconizados na norma EN NP 1504-9, nomeadamente do uso pretendido para a estrutura, tempo de vida útil, desempenho da reparação a longo prazo, disponibilidade para efetuar reparações com possível interrupção do seu funcionamento, número e custo de futuras ações de reparação e manutenção durante a vida útil da estrutura (Silva, 2008). Nesta fase é tomada uma decisão sobre as medidas a adotar (Figura 5.6) e selecionados os princípios e métodos (Figura 5.7) adequados à reparação da estrutura.

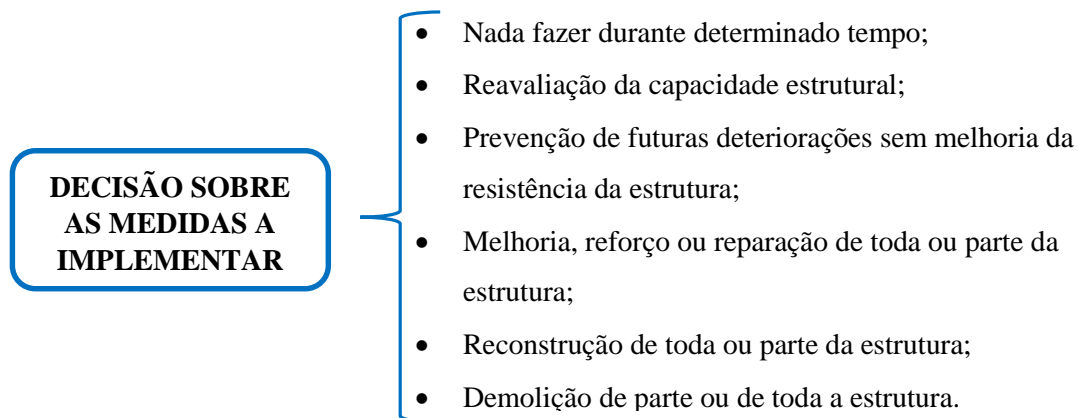


Figura 5.6 - Possíveis decisões sobre as medidas a implementar (adaptado de Silva, 2008).

Nas partes 2 a 7 da norma EN 1504 são referidos os produtos e sistemas que permitem concretizar os princípios e os métodos selecionados, com identificação das propriedades relevantes para todos os tipos de aplicação, assim como o estabelecimento de valores para essas propriedades, que devem constar do documento preparado pelo projetista (Silva, 2008).

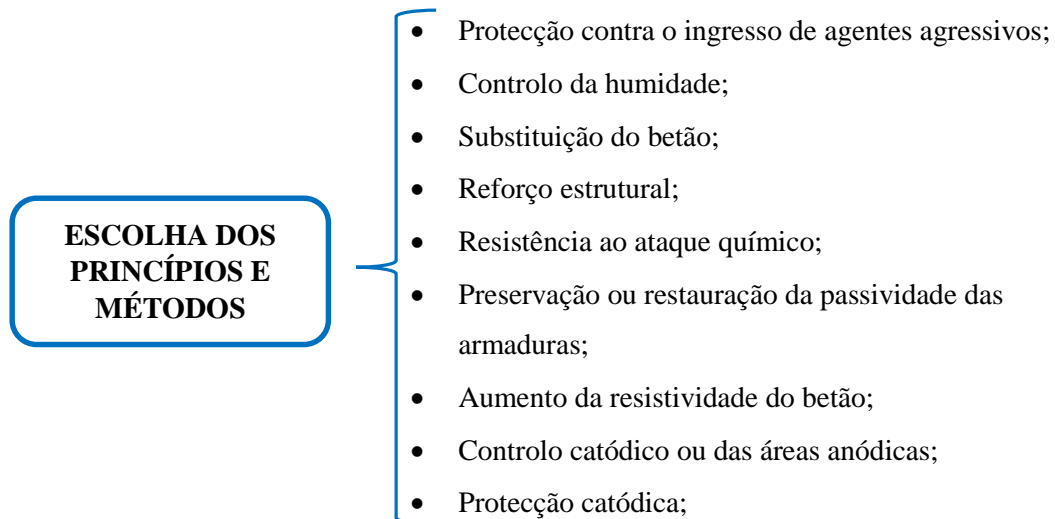


Figura 5.7 - Princípios e métodos segundo a NP EN1504 (adaptado de Silva, 2008).

Os fatores que influenciam a escolha da opção de gestão da estrutura de betão armado, subdividem-se em quatro grupos: base, estruturais, saúde/segurança e ambientais (Sousa, 2011).

Os fatores base estão relacionados com a utilização pretendida pelo dono de obra, a vida útil de serviço remanescente e a frequência e os custos de inspeções e manutenções. Os fatores estruturais são de âmbito técnico, nomeadamente a previsão de ações que surgirão durante e após os trabalhos de reparação, bem como o cálculo da capacidade resistente da estrutura a essas mesmas ações. Os fatores ligados à saúde/segurança estão intrinsecamente ligados à salvaguarda de bens e pessoas durante as operações de reabilitação de uma estrutura. Os fatores ambientais referem-se à exposição ambiental a que a estrutura está sujeita e que pode determinar a necessidade de reparação ou apenas de proteção e prevenção de patologias futuras (Sousa, 2011).

Outro fator relevante nas obras de reparação ou proteção de estruturas de betão armado é a questão financeira. Deve ser elaborada uma estimativa de custos, considerando os custos dos produtos em função do seu rendimento, o tempo de espera entre aplicações de demãos ou produtos, o tempo para que a resistência do produto seja alcançada e as condições de aplicação em obra (Batista, 2012; Sousa, 2011).

### **Fase de dimensionamento**

Na fase de dimensionamento deve ser realizada uma avaliação preliminar para determinar se é possível aplicar a técnica preconizada pela norma para determinado caso concreto. Se a técnica indicada pela norma for exequível, faz-se uma seleção preliminar de produtos e sistemas, caso contrário, será necessário adotar outra técnica ou método de reparação. Satisfeitas as verificações, estão reunidas as condições para o projetista elaborar as condições técnicas, onde deve definir os requisitos para a execução da reabilitação, especificar as características dos produtos e sistemas e os procedimentos de execução dos trabalhos e elaborar o plano de controlo de qualidade de todas as etapas da obra (Silva, 2008).

Nesta fase de dimensionamento, a norma EN NP 1504 apenas intervém durante o processo de seleção de sistemas e produtos (Silva, 2008). As propriedades dos produtos e sistemas requeridas para satisfação dos princípios de proteção e reparação devem ser selecionadas a partir das partes 2 a 7 da EN 1504. Os produtos ou sistemas escolhidos deverão ser compatíveis entre si e com os elementos a reparar por forma a evitar reações físicas e químicas que possam ocorrer levando à degradação dos materiais.

### **Fase de execução**

A primeira etapa desta fase é a preparação dos elementos a serem reparados antes da reparação propriamente dita. Deverão ser retiradas e ensaiadas amostras dos diferentes sistemas e produtos a fim de serem comparadas com os valores de aceitação previstos no plano de controlo de qualidade. Caso os ensaios efetuados não sejam satisfatórios, deverão ser colocadas em prática medidas de resolução dos problemas detetados. O passo seguinte é a inspeção final e aprovação, de forma a se verificar um conjunto de aspetos relacionados com todo o processo de execução de modo a detetar possíveis defeitos e a avaliar se estes se encontram dentro das tolerâncias admissíveis. Caso se verifique que a obra está em conformidade com o projetado termina a fase de execução com a receção do projeto de reforço ou reparação (Silva, 2008).

O modo de execução dos trabalhos é parte determinante no complexo processo de proteção e reparação de estruturas de betão armado. A norma NP EN1504-10 (2008) define para cada método de reparação três fases de processo: preparação do substrato, aplicação de produtos e sistemas, controlo da qualidade. A primeira fase pode dividir-se em duas partes: a preparação do betão e a preparação das armaduras. O controlo de qualidade dos trabalhos de reparação é efetuado por intermédio de observações e/ou ensaios, dependendo do método utilizado na reparação. A norma NP EN 1504-10 (2008) indica quatro fases de realização de ensaios e observações: condições do substrato antes ou depois da preparação, aceitação de produtos e sistemas, condições e requisitos antes ou durante a aplicação e condição final de endurecimento.

### **Fase de inspeção/monitorização/manutenção**

Esta fase tem carácter facultativo sendo geralmente implementada em estruturas de elevada importância. No entanto, é aconselhável fazer um acompanhamento e monitorização das estruturas intervencionadas e inspeções periódicas em todas as estruturas que foram objeto de obras de reparação ou reforço (Silva, 2008).

Em determinados casos, o caderno de encargos estabelece a implementação de um plano de monitorização da estrutura reparada ou reforçada com a finalidade de acompanhar o seu desempenho. O tempo aconselhado para inspeções visuais é de ano a ano enquanto inspeções mais detalhadas são aconselhadas a cada seis anos e todas devidamente documentadas (Silva, 2008). Em inspeções mais aprofundadas e detalhadas deverão ser pesquisados defeitos menos

visíveis recorrendo a ensaios não destrutíveis, sempre que possível. Nos casos em que seja necessário proceder a manutenção, a mesma deverá ser executada segundo as orientações dos fabricantes dos produtos usados e/ou do plano de manutenção elaborado pelo projetista (Silva, 2008; Sousa, 2011).

#### **5.4. Princípios e métodos de proteção, reparação e reforço**

Segundo a norma NP EN 1504-9 (2009) os métodos de reparação são agrupados em função do princípio definido para a intervenção. A norma contém onze princípios estando os seis primeiros relacionados com a deterioração do betão e os cinco restantes relacionados com a corrosão das armaduras. Poderão ser utilizados variados métodos de reparação em sobreposição desde que se considere o risco de surgirem consequências indesejáveis devido a essa sobreposição (Saraiva, 2007).

De seguida apresenta-se um resumo dos princípios e métodos de proteção ou reparação especificados na norma NP EN 1504-9 (2009):

**Princípio 1 – Proteção contra o ingresso** – está relacionado com intervenções de proteção e prevenção de agentes agressivos de forma a minimizar a fragilidade da camada superficial, incluindo medidas de redução da porosidade e permeabilidade da mesma. Este princípio contempla os seguintes métodos de reparação e proteção: impregnação hidrofóbica, revestimento superficial, fendas localmente tapadas, enchimento de fendas, transformação de fendas em juntas, colocação de painéis externos e aplicação de membranas.

**Princípio 2 – Controlo da humidade** – permite limitar certos tipos de deterioração da estrutura que se propagam com ambientes húmidos. Os métodos a adotar para combater estas deteriorações são permeáveis ao vapor de água permitindo a saída da humidade. Os métodos de reparação e proteção deste princípio são os seguintes: impregnação hidrofóbica, revestimento superficial, proteção física ou camada de recobrimento e tratamento eletroquímico.

**Princípio 3 – Substituição do betão** - deverá ser utilizado em casos em que o betão se encontre significativamente deteriorado, devido a ações mecânicas como impactos, vibrações, erosão ou delaminação por corrosão das armaduras. Os métodos de reparação e proteção deste princípio são os seguintes: aplicação de argamassa à mão, nova betonagem, projeção de argamassa ou de betão e substituição de elementos.

**Princípio 4 – Reforço estrutural** - o reforço estrutural é maioritariamente utilizado nos casos em que o betão se encontra extremamente deteriorado e com a sua capacidade resistente limitada. Os métodos de reparação e proteção têm como objetivo o reforço da capacidade resistente da estrutura do betão armado através de adição ou substituição de armaduras, colagem

de chapas de reforço, colocação de argamassa à mão, injeção ou enchimento de fendas ou vazios, instalação de elementos de pré-tensão ou pós-tensão.

**Princípio 5 – Resistência física** – está relacionado com defeitos à superfície do betão devido a ataques biológicos ou erosão. O aumento da resistência superficial da estrutura é o objetivo deste princípio que tem os seguintes métodos de reparação e proteção: execução de camadas de recobrimento ou revestimento, impregnação e adição de argamassa ou betão.

**Princípio 6 – Resistência ao ataque químico** - pretende dotar as estruturas de uma maior capacidade de suportar um ataque químico. A norma define os seguintes métodos para este princípio: execução de camadas de recobrimento ou revestimento e também a adição de argamassa ou betão.

**Princípio 7 – Preservação ou restituição da camada passiva das armaduras** – está relacionado com defeitos nas armaduras quando estas se encontram despassivadas ou em processo de despassivação, evitando ou limitando assim a corrosão. Os métodos de reparação e proteção deste princípio são: aumento do recobrimento com argamassa ou betão, substituição de betão contaminado ou carbonatado, realcalinização eletroquímica do betão carbonatado, realcalinização do betão carbonatado por difusão e extração eletroquímica dos cloretos do betão.

**Princípio 8 – Aumento da resistividade do betão** - pretende diminuir o risco ou evolução da corrosão das armaduras limitando as trocas entre o ânodo e o cátodo, por exemplo, por via da diminuição da humidade e conseqüente aumento da alcalinidade e resistividade do betão, através dos métodos de impregnação hidrofóbica e de revestimento superficial.

**Princípio 9 – Controlo catódico** - visa impedir a formação de uma zona catódica, para que não se dê o processo eletroquímico que origina a corrosão nas zonas anódicas. Este princípio contempla apenas um método de proteção que é a limitação do teor de oxigénio no cátodo por saturação do betão ou revestimentos superficiais.

**Princípio 10 – Proteção catódica** - implica a criação de um sistema que impeça a formação de zonas anódicas colocando um elemento que irá funcionar como ânodo de sacrifício, ou por imposição de um campo elétrico negativo fornecido por uma fonte de alimentação externa em simultâneo com a colocação de um ânodo na superfície do elemento de betão. Este princípio preconiza um único método que é a aplicação de potencial elétrico.

**Princípio 11 – Controlo das áreas anódicas** - é utilizado para prevenir a formação de zonas anódicas no aço, recorrendo a revestimentos diretos na armadura ou à sua proteção com inibidores de corrosão. Os métodos de reparação e proteção deste princípio são os seguintes: pintura das armaduras com tintas que contenham pigmentos ativos, pintura das armaduras com tintas que funcionem como barreiras e aplicação de inibidores de corrosão no betão.

## 6. PROTECÇÃO, REPARAÇÃO E REFORÇO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO

As técnicas de reabilitação podem ser, geralmente, divididas em três grupos: técnicas de proteção, de reparação e de reforço (Correia, 2011). As técnicas de proteção das estruturas de betão armado têm como objetivo o aumento das barreiras aos agentes agressivos e a redução das condições de degradação. Estas técnicas podem ser as impregnações, pinturas, revestimentos, colocação de membranas, selagem de juntas ou injeções de betão ou argamassas. As técnicas de reparação são utilizadas para repor as características iniciais das estruturas de betão antes de sofrerem a degradação. Entre este grupo de técnicas estão o preenchimento de fendas, vazios e zonas porosas, reparação de descasques e zonas fragmentadas ou com desagregações. Por último, existem as técnicas de reforço que aumentam a capacidade resistente da estrutura recorrendo a encamisamento, adição de chapas coladas e elementos em FRP, introdução de perfis metálicos, pré-esforço exterior, novos elementos estruturais e até a criação ou eliminação de ligações entre vários elementos da mesma estrutura.

### 6.1. Técnicas de proteção

Existem várias técnicas e métodos de proteção do betão e das armaduras, que quando são necessários, devem ser escolhidos segundo os seguintes parâmetros (Correia, 2011):

- Melhorar as propriedades físicas do betão de forma a aumentar a capacidade de resistência às condições de exposição;
- Alterar as condições de exposição, através de selagem de juntas, injeção de fissuras, pinturas ou impregnações;
- Instalar barreiras entre a estrutura e o meio agressivo com recurso à colocação de painéis exteriores ou membranas;
- Alterar o comportamento eletroquímico da estrutura (proteções catódicas ou argamassas realcalinizantes).

A parte 10 da norma NP EN 1504 define um conjunto de trabalhos de preparação comuns a todos os métodos e técnicas de proteção ou reparação de estruturas de betão armado. No caso das técnicas de proteção, estas requerem uma preparação prévia das superfícies ou, eventualmente, remover o betão degradado. Também devem ser seguidos os procedimentos referidos nas fichas técnicas dos produtos a utilizar. Assim sendo, destacam-se os seguintes métodos utilizados na preparação das superfícies (Correia, 2011; Farinha, 2010):

- Remoção/corte do betão degradado;
- Decapagem da camada superficial;
- Aumento da porosidade da superfície;
- Remoção de tintas não aderentes e material em zonas de corrosão;

- Limpeza/lavagem da superfície;
- Saturação de superfícies.

A remoção ou corte do betão degradado deve ser feito com recurso a martelos ligeiros de ponteiro em ponta viva, discos de corte ou martelo e escopro. A remoção do material deve ser feita a uma profundidade suficiente para remover toda a parte degradada do betão ou nociva para as armaduras, o corte deve ir além das armaduras em cerca de 2 a 3 cm em profundidade e as arestas internas devem ter um talude de 1:3 e os cantos arredondados de forma a aumentar a aderência ao material de reposição (Correia, 2011).

A decapagem da camada superficial deve ser executada com jato abrasivo de areia, lixadeiras rotativas, martelo de agulhas ou com escovas manuais no caso do aço em zonas pouco acessíveis. A Figura 6.1 ilustra dois métodos de decapagem e remoção de betão.



Figura 6.1 - Decapagem e remoção de betão de recobrimento com jato de areia a) e com martelo de agulhas b) (adaptado de Correia, 2011).

Para realizar o aumento da porosidade da superfície deve-se recorrer a jato de areia ou de água. No caso da remoção total de tintas não aderentes e material em zonas corroídas também se pode recorrer a um jato de areia.

A limpeza ou lavagem das superfícies têm como objetivo limpar poeiras e outras partículas resultantes do corte ou decapagem do betão ou ainda para remoção de impurezas minerais (sais) e orgânicas (óleos, tintas, etc.) e pode ser feita com jato de ar comprimido, jato de areia, jato de água ou jato de vapor.

A saturação das superfícies serve para melhorar a aderência das mesmas a betões ou argamassas que serão aplicadas sobre elas e deve ser executada por um período de cerca de 12 horas (Correia, 2011). As formas mais comuns de saturar as superfícies são através da molhagem direta e contínua (no caso de lajes), aplicação de tecidos humedecidos sobre a superfície (em vigas e pilares) ou ainda através de mangueiras furadas que borrifam a superfície (paredes).

As técnicas de proteção mais utilizadas são as impregnações, as pinturas, colocação de membranas e a selagem de juntas (Correia, 2011; Farinha, 2010). De seguida apresenta-se cada uma destas técnicas enunciando exemplos de produtos, vantagens na sua utilização, o campo de aplicação, as técnicas de execução e alguns cuidados exigidos para a sua execução.

### 6.1.1. Impregnações para proteção do betão

As impregnações são feitas recorrendo a um material que posteriormente à sua aplicação penetra na estrutura porosa do betão ou que repele a água ou humidade. A sua ação promove a redução da absorção capilar e o aumento da resistência superficial. As impregnações podem ser constituídas por produtos como os silanos, siliconatos ou silicatos de sódio e podem ser consideradas de impregnações de preenchimento total, parcial ou hidrófobos (Correia, 2011). A Figura 6.2 demonstra a aplicação de impregnações para proteção do betão armado.



Figura 6.2 - Impregnação com silanos no viaduto Duarte Pacheco em Lisboa (adaptado de Correia, 2011).

O seu campo de aplicação é a proteção das estruturas de betão contra os ciclos gelo-degelo, os cloretos e a carbonatação, embora seja menos eficaz neste último caso. A sua aplicação pode ser feita através de rolo ou por um sistema de pulverização e requer as superfícies limpas e os poros abertos. A sua durabilidade é um pouco limitada pois vai-se degradando ao longo dos anos (Brito, 2004; Correia, 2011).

### 6.1.2. Pinturas para proteção do betão

As pinturas são bastantes utilizadas na área da construção civil e são realizadas aplicando uma película de um material na superfície do betão com o objetivo de controlar a absorção de água, a transmissão de vapor e a difusão de líquidos agressivos e gases. Podem ser aplicadas na proteção contra os cloretos, a carbonatação, os ciclos gelo-degelo e os ataques químicos (Correia, 2011). As pinturas mais utilizadas são as acrílicas, epóxicas, vinílicas ou as de poliuretano, como no exemplo da Figura 6.3. Estas pinturas podem ser aplicadas através de rolo ou trincha e a sua durabilidade é limitada, embora possa ser melhorada se for complementada com impregnações. O suporte deve estar limpo, seco, o mais liso possível e sem fissuras ou arestas vivas (Brito, 2004; Correia, 2011).



Figura 6.3 - Pintura com tinta de poliuretano na pala do Pavilhão de Portugal em Lisboa (adaptado de Correia, 2011).

### 6.1.3. Revestimentos e membranas para proteção do betão

Os revestimentos para proteção do betão são aplicados para aumentar a proteção mecânica das estruturas, assim como a proteção contra a carbonatação através de argamassas de realcalinização ou de polímeros modificados, ou a proteção contra o ataque químico utilizando betões ou argamassas resistentes ao meio químico agressivo envolvente. Antes da aplicação deve-se garantir que o suporte se encontra com uma superfície rugosa e saturado (Correia, 2011).

As membranas podem ser consideradas como uma película que é colocada na superfície do betão para a sua proteção a agentes agressivos. Existem alguns tipos de membranas pré-fabricadas como as telas betuminosas (Figura 6.4) e as telas de PVC, ou alguns produtos fabricados *in situ* como por exemplo alguns produtos líquidos ou pastosos e cimentos especiais. As superfícies onde se vão aplicar as membranas devem estar lisas, secas e sem irregularidades no caso de aplicação de telas.



Figura 6.4 - Aplicação de telas betuminosas para proteção do betão (adaptado de Correia, 2011).

### 6.1.4. Selagem de juntas para proteção do betão

A selagem de juntas faz-se mediante a aplicação de um material no interior ou sobre a abertura de uma junta existente na estrutura de betão armado. O objetivo desses trabalhos é impedir a entrada de líquidos e/ou gases e a transmissão e/ou absorção de energia das cargas.

### 6.1.5. Proteção das armaduras contra a corrosão induzida por cloretos

Existem várias técnicas para proteger as armaduras contra a corrosão induzida por cloretos, tanto em estruturas novas como nas estruturas já existentes. No caso de estruturas novas, as técnicas mais usuais são as seguintes (Correia, 2011):

- A - pintura das armaduras com resina epóxida (embora a sua utilização não seja consensual devido à sua durabilidade, aderência do betão às armaduras e à sua resistência a agentes agressivos) ou utilização de armaduras não sujeitas a corrosão como as armaduras em aço galvanizado, aço inox ou perfis pultrudidos de fibra de vidro (GFRP do inglês “Glass Fibre Reinforced Polymer”);

- B - betão com aditivos inibidores (nitrito de cálcio/sódio, aminas);

- C - revestimento cimentício de baixa permeabilidade;

- D - betão de baixa permeabilidade, com betões de microsíllica;
- E – selantes, pinturas ou membranas superficiais.

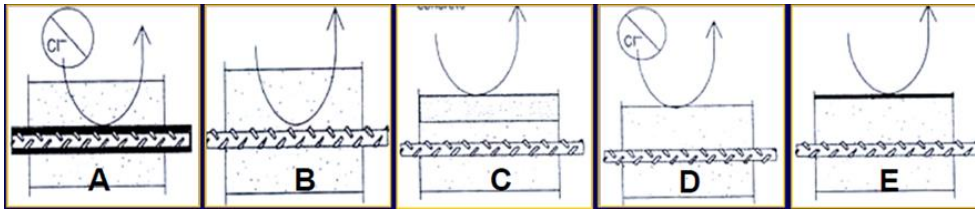


Figura 6.5 - Técnicas de proteção das armaduras contra a corrosão induzida por cloretos em estruturas novas (adaptado de Correia, 2011).

Nas estruturas existentes, as técnicas de proteção mais usadas são (Correia, 2011):

- A - remoção do betão contaminado e aplicação de betão ou argamassa de baixa permeabilidade;
- B - pinturas ou membranas de proteção;
- C - proteção direta das armaduras com resina epóxida;
- D - aplicação de selante sobre o betão contaminado;
- E - aplicação de aditivo inibidor (por aspersão) que se impregna;
- F - proteção catódica com introdução de um ânodo sacrificial (sendo o zinco o mais comum) com maior potencial eletroquímico.

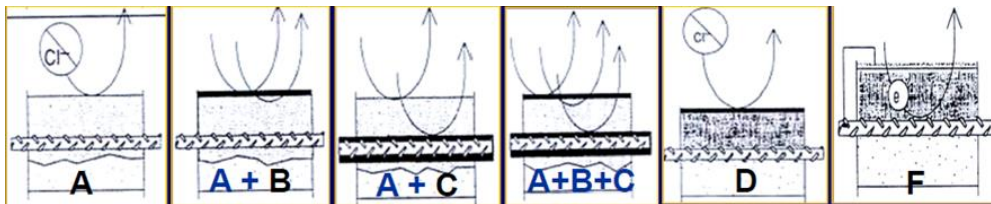


Figura 6.6 - Técnicas de proteção das armaduras contra a corrosão induzida por cloretos em estruturas existentes (adaptado de Correia, 2011).

### 6.1.6. Proteção catódica das armaduras

A proteção catódica tem como função reduzir ou eliminar a corrosão, mediante um processo que torna o potencial elétrico do aço mais positivo (catódico), através da passagem de uma corrente contínua de baixa intensidade de um ânodo para o aço através do betão (Silva, 2007).

A introdução de corrente contínua pode ser obtida ligando o aço a um ânodo de sacrifício que se dissipa gradualmente, ou através de um ânodo inerte e uma fonte externa de alimentação de corrente contínua. O primeiro caso designa-se por proteção catódica por ânodo de sacrifício e o segundo por proteção catódica por corrente imposta. O betão funciona como um eletrólito, ou seja, tem a capacidade de transmitir energia elétrica (Silva, 2007).

A passagem de corrente elétrica inverte o processo da corrosão, induz modificações químicas na interface betão/armaduras reduzindo o oxigénio e a produção de iões hidróxido, levando a um aumento da alcalinidade do betão. Durante este processo os iões cloreto e sulfatos são repelidos pelas armaduras devido à restauração da camada passivante das armaduras (Silva, 2007).

A proteção catódica por ânodo de sacrifício é feita adicionando à estrutura um elemento formado por uma liga anódica galvânica, normalmente constituída por zinco e uma matriz cimentícia. Estes elementos são normalmente fixados às armaduras e podem ainda funcionar como espaçadores como é o caso das pastilhas Z da Figura 6.7 (Correia, 2011; Silva, 2007).

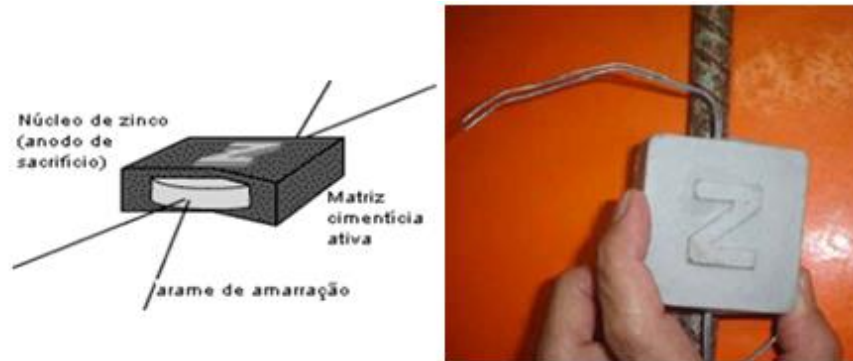


Figura 6.7 - Pastilhas Z para proteção catódica das armaduras (adaptado de Correia, 2011).

A proteção catódica por corrente imposta utiliza uma malha de titânio ativado revestida com óxidos de metais nobres (Ti/MMO) que é fixada nas armaduras com fixadores de plástico à superfície do elemento a proteger e protegida com uma argamassa de recobrimento aplicada por projeção. Em vez de uma malha, pode-se aplicar a mesma proteção catódica mas através de fitas de malha do mesmo material (Titanium/Mixed Metal Oxides) que são colocadas em roços pouco profundos abertos na superfície do betão e cobertas com argamassas de baixa resistividade (Silva, 2007). Este procedimento pode ser observado na Figura 6.8.



Figura 6.8 - Fitas de Ti/MMO a), abertura de roços no betão b), instalação das fitas nos roços c), aplicação de argamassa de enchimento nos roços d) (adaptado de Correia, 2011).

### 6.1.7. Proteção das armaduras contra a corrosão induzida por carbonatação

As técnicas de proteção das armaduras contra a corrosão induzida por carbonatação do betão podem ser de vários tipos (Correia, 2011):

- A – Em construções novas, pode-se utilizar betão de baixa permeabilidade, com a incorporação de aditivos;
- B – Através de pintura da superfície do betão (pinturas de alta densidade e baixa permeabilidade – acrílicas, metacrilatos, epóxi);
- C - impregnação superficial com silicatos de sódio;
- D - reparação superficial com argamassas realcalinizantes;

- E - selagem de fendas (poliuretanos);
- F - realcalinização forçada (aplicação de uma grelha metálica e pasta alcalina na superfície que, através de uma corrente forçada, se vai impregnando no betão).

A Figura 6.9 ilustra os pontos referidos anteriormente.

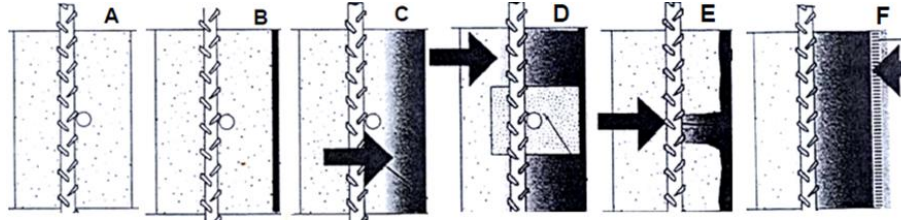


Figura 6.9 - Representação esquemática das fases de proteção de armaduras contra a corrosão induzida por carbonatação do betão (adaptado de Correia, 2011).

### 6.1.8. Proteção do betão contra o ataque químico

Nos ambientes agressivos quimicamente, a técnica mais usada em estruturas novas é a aplicação de uma barreira de superfície que impeça o ataque químico ao betão. Os materiais que formam essa barreira são escolhidos em função do tipo de ataque mas podem ser de materiais como o epóxido, metacrilato, poliéster, poliuretano ou de silicato de potássio (Correia, 2011).

Em estruturas existentes podem-se aplicar duas técnicas distintas: remover o betão contaminado e aplicar um betão de reparação convencional e de uma barreira de superfície, ou então, depois de remover o betão contaminado, aplicar um betão ou uma argamassa resistente ao agente agressivo em causa (Correia, 2011).

### 6.1.9. Proteção do betão contra os ciclos gelo-degelo

Os ciclos de gelo-degelo podem conduzir a uma acelerada degradação da camada superficial do betão. Em estruturas novas a proteção do betão pode fazer-se através da utilização de barreiras de superfície através da aplicação de pinturas, membranas ou selantes sobre o betão que pode ser convencional ou um betão resistente a este fenómeno, com baixa razão água-cimento, baixa permeabilidade e aditivos introdutores de ar. Nos casos em que as estruturas já sofreram danos, a técnica mais comum é a remoção do betão deteriorado e aplicação de betão resistente aos ciclos gelo-degelo e de barreiras de superfície, ambos com as características atrás indicadas (Correia, 2011).

## 6.2. Técnicas de reparação

As reparações realizadas a uma estrutura de betão podem ter vários objetivos como aumentar a capacidade resistente (ou a rigidez) residual da estrutura até esta atingir de novo o nível correspondente ao cálculo inicial, melhorar o aspeto visual da estrutura, melhorar o seu desempenho funcional, garantir a impermeabilidade e aumentar a durabilidade (Correia, 2011). Ao longo dos anos, as técnicas de reparação têm vindo a evoluir acompanhadas também pela melhoria das características dos materiais utilizados nas reparações.

De seguida apresentam-se algumas técnicas utilizadas em reparações de algumas patologias do betão armado, tais como: fendas, vazios e zonas porosas, descasques e zonas fragmentadas, desagregações e zonas contaminadas ou com elevado nível de corrosão.

### **6.2.1. Reparação de fendas**

Antes de se partir para a reparação de fendas é necessário analisar a sua atividade e as suas causas e saber se essa fenda deve ser reparada ou não. Caso se repare uma fenda sem efetuar essa análise, podem surgir novas tensões de tração excessivas, e o betão pode voltar a fendilhar no mesmo local ou noutra próximo dele. Importa então saber se estamos perante uma fenda ativa ou viva e uma fenda inativa ou morta. As fendas ativas geralmente surgem em estruturas que estão submetidas a ações alternadas ou a variações de temperatura sem que tenham sido previstas juntas de dilatação. Este tipo de fendas não é estacionário ao longo do tempo, podem-se ir abrindo ao longo do tempo ou podem ir abrindo e fechando alternadamente (Medas, 2013; Saraiva, 2007).

A reparação de fendas no betão realiza-se geralmente por injeção de um material sob pressão de modo a preencher o espaço vazio da fenda, restabelecendo a estanqueidade e as propriedades mecânicas do elemento em causa. A escolha do material de reparação depende da abertura da fissura mas hoje em dia existem vários materiais com elevada aderência ao suporte. As resinas epóxicas são as mais utilizadas em fendas inativas de aberturas pequenas ou médias e as caldas cimentícias são utilizadas na reparação de fendas de aberturas maiores (Correia, 2011; Saraiva, 2007).

As resinas são constituídas habitualmente por uma resina líquida (epóxida ou poliuretano, por exemplo) e um endurecedor (fenol ou amina). As principais propriedades e vantagens destas resinas são a boa trabalhabilidade, cura rápida, são não retráteis, apresentam resistência aos agentes químicos, impermeabilidade, resistência à tração e excelente aderência ao betão (Saraiva, 2007). Apesar de todos estes pontos positivos, também apresentam alguns problemas ou desvantagens como a baixa resistência a temperaturas elevadas, não aderem a superfícies húmidas e o seu tempo de trabalhabilidade varia entre os 5 e os 30 minutos diminuindo com a temperatura e com a quantidade misturada e não deve exceder 15% da tensão de rotura para tensões permanentes (Saraiva, 2007).

#### **Procedimento de reparação de fendas por injeção sob pressão:**

1. Remoção do betão degradado (caso exista) na zona da fenda;
2. Alargamento da abertura superficial (em V) em todo o comprimento da fenda;
3. Limpeza de pó e detritos com jato de água ou de ar comprimido;
4. Selagem da superfície longitudinal da fenda (para o material aglutinante não sair durante operação de injeção);

5. Furação da superfície ao longo da fenda em intervalos regulares pré-determinados. O espaçamento deve ter em conta a largura da peça a reparar, a profundidade das fendas, eventuais bifurcações, a viscosidade da resina e a pressão de injeção;
6. Aplicação de tubos metálicos ou de plástico e aplicação da mangueira de injeção nos furos previamente executados;
7. Verificação de eventuais obstruções entre 2 tubos e da efetividade da selagem;
8. Preparação do material de reparação, mistura com equipamento próprio (resina bi-componente) e ajuste da mangueira aos tubos;
9. Injeção do material de reparação (24h após selagem);
10. Selagem dos furos (cera de parafina ou o próprio material de injeção) e reparação cosmética das superfícies (após 12-24h);
11. Verificação da eficiência da injeção através de extração de carotes cilíndricas ou ensaio de ultrassons. Os resultados devem ser considerados satisfatórios se a penetração da resina atingir pelo menos 90% da profundidade da fenda.

A injeção do material de reparação em fendas verticais inicia-se pelo furo inferior passando-se para o seguinte quando este purga material e em fendas horizontais inicia-se por um furo central e prosseguindo alternadamente nos furos contíguos, ou divide-se em troços e completa-se cada uma antes do início do seguinte. Deve-se manter pressão máxima durante alguns instantes para o material chegar às zonas mais estreitas da fenda, no entanto, a pressão de injeção não pode exceder a resistência da selagem superficial. É importante verificar causas de eventuais consumos excessivos (anormais) de resina nos casos em que se verifique uma rotura da selagem superficial ou a ausência de selagem numa dada zona e ainda nos casos em que haja fendas a comunicar com vazios interiores de grandes dimensões. Na Figura 6.10 pode-se observar a execução de injeção de fendas numa laje de betão armado.



Figura 6.10 - Reparação de fendas por injeção de resina de epóxico (adaptado de Correia, 2011).

### **6.2.2. Reparação de vazios e zonas porosas**

A reparação de vazios e zonas porosas pode realizar-se da mesma forma e com os mesmos materiais que são utilizados na reparação de fendas. Em vazios de pequenas dimensões aplicam-

se resinas epóxicas ou acrílicas ou argamassas de cimento não retráteis que podem ser constituídos eventualmente com cargas. Em vazios de maiores dimensões utilizam-se argamassas não retráteis compostas por cimento e uma percentagem elevada de areia. Caso existam agregados soltos ou unidos pontualmente entre si deve-se proceder a uma limpeza eliminando o betão deteriorado, aplicar uma película de resina epóxida na superfície do betão a reparar para melhorar a ligação entre betões e preencher os vazios com betão não retrátil/expansivo (Correia, 2011).

### **6.2.3. Reparação de descasques e zonas fragmentadas**

A técnica de reparação de estruturas de betão com descasques ou zonas fragmentadas varia conforme a gravidade da patologia. No caso de descasques pouco significativos ou superficiais deve-se remover todo o material que esteja solto ou pouco seguro e deixar a superfície de contacto com o novo material de reparação irregular para melhorar a aderência. De seguida devem ser eliminadas todas as poeiras e substâncias potencialmente contaminantes. Por fim aplica-se o novo material de reparação que pode ser constituído por argamassa epóxida, argamassa não retrátil ou betão de cimento Portland normal (Correia, 2011).

Nos casos em que o betão está muito danificado ou fragmentado em profundidade, a técnica de reparação já é um pouco diferente. Assim, o betão danificado deve ser completamente removido, sobretudo em estruturas como pilares e vigas, expondo as armaduras. Nas situações em que se verifique que os varões ou parte deles sofreram deformações permanentes significativas ou que estejam danificados devem ser substituídos. Por fim, procede-se à betonagem para reparação da área danificada, recorrendo a betão aplicado manualmente ou projetado. Os betões mais utilizados nestes casos são o betão de agregados pré-colocados, betão de cimento Portland normal, betão de polímeros ou resinas e ainda betão com fibras de aço ou vidro (Correia, 2011).

#### **Reparação com betão aplicado manualmente**

Este tipo de técnica apresenta como vantagens o baixo custo, dispensa mão-de-obra especializada e verifica-se uma boa integração com o material existente. No campo das desvantagens, apresenta estádios de retração entre o material original e o betão de reparação devido ao aumento de tensões de tração na superfície de contacto, tendendo a diminuir a adesão e originando eventual fissuração e separação. Para garantir uma melhor aderência e diminuir a retração, devem-se utilizar betões com maior tensão de rotura à compressão (>5 MPa) em relação à do betão existente e reduzir a razão água-cimento (Correia, 2011).

O procedimento na técnica de reparação com aplicação manual de betão é o seguinte:

1. Retirar todo o betão deteriorado, com recurso a martelo pneumático manual, martelo elétrico ligeiro ou uma hidrodemolidora;
2. Formar mais irregularidades de forma a obter uma superfície rugosa e deixar a descoberto a armadura existente (2 a 3 cm);

3. Criar juntas de betonagem bem vincadas;
4. Retirar eventuais gorduras no betão e ferrugem no aço;
5. Retirar a poeira por lavagem com água sob pressão;
6. Saturar a superfície de contacto através de molhagem direta;
7. Aplicar o betão novo à colher e talocha ou aplicar cofragem previamente;
8. Se necessário e possível, compactar o betão novo por apiloamento, vibração ou outro meio adequado;
9. Curar todas as superfícies expostas por molhagem ou cobrindo-as com serapilheiras molhadas (pelo menos 10 dias).

### **Reparação com betão de agregados pré-colocados**

Esta técnica aplica-se por norma em situações de difícil acesso ou quando existe uma grande concentração de armaduras (Farinha, 2010).

O procedimento é o seguinte (Farinha, 2010):

- Montagem da cofragem (estanque e bem escorada);
- Colocação dos agregados grossos, seguido de molhagem dos mesmos;
- Bombeamento de argamassa cimentícia para o espaço deixado pelos agregados grossos.

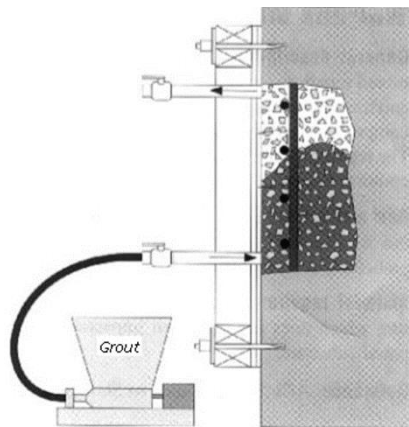


Figura 6.11 - Representação de betonagem com agregados pré-colocados (adaptado de Correia, 2011).

### **Reparação com betão projetado**

A técnica de projeção de betão é um processo contínuo de colocação de betão que dispensa o uso de cofragem. A força de impacto do jato de betão contra a superfície aumenta a aderência e também compacta o betão ao mesmo tempo. As vantagens deste processo são a excelente aderência do betão novo ao antigo, a elevada compactação e baixa razão água-cimento aumentando assim as propriedades mecânicas e a durabilidade do betão. No entanto, também apresenta algumas desvantagens como o efeito de ricochete dos agregados grossos, a necessidade de mão-de-obra especializada, baixo rendimento (m<sup>3</sup>/h) e o desperdício de algum material (Correia, 2011).

Existem dois sistemas de aplicação de betão por projeção: gunitagem por via seca ou por via húmida. Na gunitagem por via seca a hidratação da argamassa dá-se apenas na saída da mangueira de projeção. A mistura seca de cimento e agregados é introduzida no equipamento de projeção, sendo a água necessária para a hidratação da mistura adicionada na agulha, imediatamente antes da projeção. Na gunitagem por via húmida a mistura hidratada é bombada através da mangueira de projeção. A mistura é preparada numa central de betão, de forma semelhante ao betão corrente, com toda a água necessária para a sua hidratação e, posteriormente, esta mistura é transportada para a obra e projetada com equipamento adequado (Correia, 2011).

As vantagens da gunitagem por via seca são as seguintes (Correia, 2011):

- Controlo da quantidade de água de forma a ajustar a consistência do betão à saída da mangueira, evitando o escorregamento do betão;
- Não existe risco de presa precoce, menor retração e maior aderência;
- Melhor comportamento para misturas com agregados porosos e leves;
- Permite maior comprimento da mangueira de aplicação.

As vantagens da gunitagem por via húmida são as seguintes (Correia, 2011):

- Melhor controlo da quantidade de água, uma vez que é medida com exatidão na
- Maior garantia de hidratação completa da mistura;
- Menos perdas de agregados por ricochete durante a projeção;
- Menos pó durante a operação.

Os procedimentos para a execução da técnica de reparação de descasques e zonas fragmentadas, recorrendo à gunitagem para colocação do novo betão são (Correia, 2011):

1. Preparação do substrato:

- (i) remover o betão deteriorado, decapagem e lavagem das armaduras;



Figura 6.12 - Preparação do substrato – martelos pneumáticos para remoção (adaptado de Correia, 2011).



Figura 6.13 - Preparação do substrato – jato de água para decapagem e limpeza das armaduras a), Aspetto da superfície após tratamento b) (adaptado de Correia, 2011).

(ii) colocar sempre que possível ou necessário, uma armadura de pele mínima para evitar fendilhação por retração do betão projetado ou se o betão for armado, colocar a armadura.

2. Projeção de camada de argamassa (cimento, areia e água) de pequena espessura formando uma base sobre a qual se irá projetar a mistura com agregados grossos e baixo conteúdo em água sem perigo de haver um ricochete excessivo;

3. Técnicas de projeção:

- Projeção do betão das zonas inferiores para as zonas superiores, a cerca de um metro de distância e na perpendicular da superfície de forma a minimizar o ricochete;

- O betão deve ser aplicado em camadas finas (espessura entre 25 a 75 mm).



Figura 6.14 - Aplicação do betão projetado (adaptado de Correia, 2011).

4. Cura de cada camada através de repetidas molhagens das superfícies;



Figura 6.15 - Cura das superfícies reparadas através de um sistema automático de rega (adaptado de Correia, 2011).

5. Esperar o tempo de presa para aplicação de nova camada (6 a 12 h, consoante a utilização de aceleradores de presa);

6. Espessura total não deve ultrapassar os 15 a 20 cm;

7. Evitar mexer a superfície do betão projetado;

### **Reparação com betão projetado com fibras de aço**

O betão com fibras de aço é constituído com cerca de 20% mais cimento do que o betão normal e com agregados de pequeno diâmetro (5 a 10 mm) e uma quantidade limitada de fibras de aço que pode chegar no máximo a 80 kg/m<sup>3</sup>, e com comprimento inferior a 50 mm e diâmetros de 0,3 a 0,5 mm (Correia, 2011).

As vantagens da utilização do betão com fibras de aço são a reduzida retração diminuindo a tendência para fissurar e também apresenta um aumento das resistências à compressão e à tração, da resistência ao choque (entre 5 e 10 vezes) e da extensão de cedência (50 a 100%) (Correia, 2011). A necessidade de proteção deste betão devido à corrosão das fibras é a desvantagem deste tipo de betão. A última camada do betão projetado (pelo menos 20 mm) não deve conter fibras de aço ou devem-se utilizar fibras galvanizadas (Correia, 2011).

### **Reparação com betão projetado com fibras de vidro**

O betão projetado reforçado com fibras de vidro apresenta uma elevada resistência aos álcalis e tem as seguintes vantagens (Correia, 2011):

- Elevada resistência ao desgaste (baixa razão água-cimento e utilização de agregados duros de forma lisa e regular);
- Elevada resistência ao impacto, fortemente influenciada pelas fibras de vidro;
- Comportamento não desprezável à tração;
- Reduzida retração / fissuração;
- Elevada resistência química e às ações de gelo e degelo;
- Bom comportamento ao fogo.

### **Reparação de desagregações**

A desagregação do betão é uma patologia típica de um ataque químico devido à ação dos ácidos, sulfatos e álcalis, da ação do fogo e dos ciclos gelo-degelo. Em muitas situações, pode não haver possibilidade de efetuar uma reparação sem proceder à demolição do elemento ou da estrutura afetados. Porém, quando a reparação ainda é viável, o procedimento técnico é o seguinte:

1. Remoção da parte do betão que está deteriorado;
2. Aplicação de um betão mais adequado ao meio ambiente agressivo;
3. Em alternativa, ou como complemento, podem utilizar-se soluções de proteção como por exemplo as argamassas resistentes aos ataques químicos ou revestimentos impermeabilizantes (resinas epóxicas).
4. É importante também proceder à eliminação da causa da patologia ou pelo impedimento do acesso dos agentes agressivos aos materiais mais vulneráveis.

### **6.3. Técnicas de reforço**

As técnicas de reforço de estruturas de betão armado têm como objetivo aumentar a capacidade resistente e/ou a rigidez em relação ao seu nível inicial de projeto. As técnicas de reforço mais usadas são o encamisamento do betão, a colagem de chapas metálicas ou de materiais compósitos (sistemas FRP), introdução de perfis metálicos, pré-esforço exterior, inserção de novos elementos estruturais, criação ou eliminação de ligações internas e introdução de deslocamentos impostos (Correia, 2011).

### 6.3.1. Reforço por encamisamento com betão armado

O encamisamento é a técnica de reforço mais comum e também aquela que melhor se identifica com a regra de os materiais novos e os existentes terem características e comportamento mecânico semelhantes. Esta técnica consiste na utilização de materiais cimentícios e armaduras em varão com o objetivo de conferir maior resistência e/ou rigidez aos elementos existentes danificados ou com deficiências estruturais (Correia, 2011).

Esta técnica é aplicada quando há a necessidade de aumentar a capacidade resistente à flexão composta e/ou ao esforço transversal em pilares e paredes, ou para aumentar a capacidade resistente à flexão simples e ao esforço transversal em vigas e lajes. Esta técnica garante uma eficácia de funcionamento elevada (desde que garantida a aderência entre materiais e o monolitismo), tem um custo relativamente reduzido e uma execução rápida e não necessita de mão-de-obra especializada. As desvantagens apontadas a esta técnica são as dimensões finais superiores às iniciais e o tempo de espera que o betão novo precisa para adquirir resistência suficiente para ser carregado (Correia, 2011).

#### **Técnica de reforço de uma viga (caso em que existe aumento da altura da viga):**

1. Picagem e remoção do betão da superfície inferior da viga até encontrar os estribos da viga;
2. Soldadura de prolongamentos de dimensões adequadas para suportar os esforços de deslizamento longitudinal que possam aparecer entre a viga e o betão de reforço;
3. Colocação das armaduras longitudinais adicionais;
4. Colocação das cofragens;
5. Betonagem do conjunto (gravidade ou bombagem);
6. Cura (mínimo 10 dias).

Na Figura 6.16 pode-se observar uma viga no processo de reforço por encamisamento já com as armaduras de reforço colocadas.



Figura 6.16 - Reforço de uma viga (adaptado de Correia, 2011).

Para se conseguir uma boa aderência entre os dois betões, podem ser aplicadas estas técnicas (eventualmente complementares) (Correia, 2011):

1. Soldar as armaduras novas às armaduras existentes;
2. Aplicar na superfície de contacto uma camada de resina ou argamassa epóxida;
3. Saturar a superfície do betão existente durante pelo menos 6 horas;

4. Aplicar uma primeira camada preparatória de 10 mm de espessura de betão mais rico em cimento e de granulometria mais fina.

**Técnica de reforço de uma viga (caso em que não existe aumento da altura da viga):**

1. Execução de roços longitudinais na face tracionada;

2. Introdução de armadura adicional e eventualmente proceder à substituição das armaduras excessivamente deterioradas;

3. Preparação das superfícies;

4. Aplicação de argamassa epoxídica ou de betão não retráctil ou expansivo;

Os varões novos e os existentes podem ser pintados com uma resina epóxida para proteção adicional.

**Técnica de reforço de um pilar:**

1. Picar a superfície do pilar, eliminar troços de betão solto a jato de areia e limpar o pó com ar comprimido;

2. Aplicar camada de resina epóxida na superfície de contacto ou saturar a superfície do betão existente durante 6 horas;

3. Colocar as armaduras longitudinais (sempre que possível devem atravessar a laje através de orifícios) e transversais adicionais;

4. Betonagem da camada de reforço por troços de 0.5 a 1.5 m;

5. Cura (pelo menos 10 dias).



Figura 6.17 - Encamisamento de um pilar (adaptado de Correia, 2011).

**6.3.2. Reforço por adição de chapas coladas**

O reforço de estruturas de betão armado através de chapas coladas é utilizado em situações que requerem emergência de intervenção por permitir uma rápida execução. A colagem das chapas é feita, geralmente, com resinas epóxidas e podem ser complementadas por meios mecânicos. As dimensões dos elementos reforçados não são alteradas, aumentando apenas devido à espessura da chapa e de eventuais proteções contra o fogo e a corrosão da mesma (Correia, 2011; Costa, 2006).

A aplicação das chapas coladas permite aumentar a capacidade resistente à flexão simples e ao esforço transversal, sobretudo em vigas onde esta técnica é bastante aplicada, mas também em lajes. No entanto também pode ser aplicada em outros elementos estruturais como as paredes, embora com um custo elevado envolvido (Correia, 2011; Costa, 2006).

De uma forma geral, as vantagens desta técnica são a rapidez de execução com ausência de ruído excessivo ou pó e manutenção da secção existente e permite um aumento da capacidade resistente do elemento reforçado e ainda o facto de esta técnica poder ser aplicada mantendo a utilização da estrutura durante o processo de execução do reforço estrutural. No entanto, esta técnica apresenta algumas desvantagens como o elevado custo, a necessidade de mão-de-obra especializada e de controlo de qualidade de execução e ainda a necessidade de proteger as chapas do fogo e da corrosão com revestimentos apropriados (Correia, 2011).

Os procedimentos de execução desta técnica são os seguintes (Correia, 2011):

1. Aumentar a rugosidade superficial para aumentar a superfície de contacto entre a resina e a base através de jato de areia, martelo de agulhas, água sob pressão alta eventualmente com partículas metálicas, escovas de aço ou martelos pneumáticos. Limpeza das superfícies de pó e eventualmente resíduos de gorduras;

2. As chapas metálicas devem também ser objeto de um tratamento anterior à sua colocação. Devem ser cortadas com as dimensões necessárias, desengorduradas, decapadas e protegidas com uma camada de resina epóxida, caso não sejam colocadas de imediato;

3. Execução de furos para colocação das buchas dos parafusos de suporte (quando necessário). Devem ser utilizadas buchas metálicas pois permitem uma melhor ligação da chapa ao betão (ligação mecânica, aumentam a resistência por aderência e diminuem a deformabilidade da ligação), reduzem o risco de rotura frágil e permitem contar com uma resistência residual em caso de incêndio;

4. Colocação das chapas / perfis:

i) Aplicação da cola antes da colocação das chapas:

- Aplicação de camada de resina epóxida nas chapas e no betão;
- Pressão uniforme sobre a chapa até se conseguir que a espessura da camada do ligante seja adequada.

ii) Aplicação da cola após a colocação das chapas:

- Selagem das juntas entre o betão e as chapas metálicas com argamassa à base de resina epóxida e (eventual) colocação dos tubos de injeção;
- Injeção da resina epóxida e controlo do enchimento para garantir monolitismo das ligações de reforços metálicos a peças de betão;

5. Colocação do sistema de aperto que deverá ser retirado após 7 dias, no mínimo;

6. Remoção das partes de resina escorrentes e limpeza das chapas;

7. Proteção total das faces expostas com pinturas anticorrosivas aplicadas sobre uma demão de primário epóxico em pó de zinco.

A Figura 6.18 ilustra uma estrutura de betão armado em processo de reforço com chapas coladas.



Figura 6.18 - Reforço de estrutura em betão com chapas de aço coladas (adaptado de Correia, 2011).

### 6.3.3. Reforço por adição de elementos de FRP

Atualmente existem outros materiais que também são utilizados no reforço de estruturas de betão armado como por exemplo os sistemas FRP (do inglês “Fiber Reinforced Polymer”), constituídos por compósitos de resinas termoendurecíveis (poliéster, vinil éster, epóxi, fenólicas) ou termoplásticas (polietileno ou polipropileno) e fibras que podem ser de carbono (as que têm mais potencialidades), de vidro ou de outros materiais como a aramida (Silva, 2008). Os sistemas FRP são constituídos por fibras muito resistentes e com rotura frágil, ou seja, apresentam um comportamento elástico-linear até à rotura. Na sua constituição (dos FRP) está também presente uma matriz polimérica (resina, filler e aditivos) muito pouco resistente mas com várias funções importantes como protegerem as fibras das ações ambientais, transferirem e distribuírem as cargas pelas fibras e manterem as fibras na sua posição evitando a sua encurvadura quando solicitadas à compressão (Silva, 2008).

Os principais formatos dos sistemas FRP são os laminados e as mantas de CFRP (do inglês “Carbon Fiber–Reinforced Polymer”) (Juvandes, 1999; Silva, 2008). Os laminados de fibra de carbono unidirecionais endurecidos são aplicados diretamente nas estruturas através de colagem com um adesivo de resina epóxida. As mantas de fibras contínuas e unidirecionais, são endurecidas *in situ*, aglutinadas e coladas com uma matriz epóxida. Existem ainda varões e cordões ou cabos de CFRP (Juvandes, 1999; Silva, 2008).

As vantagens destes materiais são as seguintes (Correia, 2011; Silva, 2008):

- Baixo peso e espessura reduzida (96 a 288 g/m em laminados);
- Fácil transporte, manuseamento e rápida aplicação;
- Elevada resistência à flexão e tração (> 2800 MPa);
- Possibilidade de aplicação direta de pintura;

- Boa resistência química, nomeadamente à corrosão;
- Bom comportamento à fadiga e ao choque;

No entanto, também apresentam algumas desvantagens, tais como (Correia, 2011; Silva, 2008):

- Reduzida resistência aos raios UV e fogo (carecem de proteção);
- Os laminados funcionam apenas em 1 direção (as mantas/tecidos podem ser bi- ou multi-direcionais);
- Só funcionam à tração e têm baixa resistência ao esforço transversal;
- Ligação deficiente (betão / resina / fibras) em ambientes húmidos;

O campo de aplicação destes produtos pode ser o reforço de vigas à flexão e ao corte ou ao esforço transversal. Também podem ser aplicados em lajes, pilares, chaminés, silos, tanques, tubos e túneis (Correia, 2011; Silva, 2008).

#### **Técnica de aplicação das mantas:**

Antes da aplicação das mantas é necessário proceder a trabalhos prévios de preparação do elemento a reforçar (Correia, 2011):

- Reparação do betão deteriorado e tratamento das armaduras (e eventual reforço das mesmas) e reposição de secções em betão com argamassas de reparação ou microbetão;
- Arredondamento dos cantos e arestas até um raio mínimo de 10 mm;
- Remoção de poeira e resíduos que possam prejudicar a aderência;
- Inspeção da superfície e condições ambientais (não prosseguir com a aplicação se se verificar uma temperatura abaixo de 5°C ou os poros da superfície cheios de água).

Concluídos os trabalhos prévios, o método de aplicação das mantas é o seguinte (Correia, 2011):

- Aplicação de primário para preencher os poros e de argamassa de regularização;
- Aplicação da primeira camada de resina no suporte, sem pré-saturação da manta, ou diretamente na manta, com pré-saturação da manta;
- Aplicação das mantas no elemento a reforçar. O ajuste da manta ao elemento de betão pode ser feito com as mãos ou com uma talocha de borracha e seguidamente pressiona-se a manta com um rolo rígido de estrias;
- Aplicação da segunda camada de resina;
- Aplicação de uma camada de revestimento, embora seja opcional.

#### **Técnica de aplicação dos laminados:**

- Decapagem;

- Aplicação de primário;
- Aplicação de argamassa de regularização;
- Limpeza do laminado;
- Aplicação do adesivo epóxico no laminado;
- Aplicação do laminado no elemento de betão, procedendo a um ajuste manual seguido de pressão com rolo rígido de borracha;
- Remoção do excesso de adesivo com uma espátula.

Pode-se observar uma aplicação de mantas de FRP no reforço estrutural de um viaduto na Figura 6.19.



Figura 6.19 - Utilização de mantas de FRP no reforço estrutural de um viaduto. a) antes da intervenção, b) depois da intervenção (adaptado de Correia, 2011).

#### 6.3.4. Reforço com perfis metálicos

O reforço de estruturas de betão por perfis metálicos realiza-se por solidarização ou incorporação de perfis metálicos comerciais no elemento de betão. Pode ser complementada pela introdução de chapas coladas, soldadas, chumbadas ou rebitadas (Correia, 2011). As dimensões do elemento de betão não sofrem alterações apreciáveis na maioria dos reforços deste tipo. Este tipo de reforço exige um estudo dos efeitos do reforço de um elemento estrutural nos restantes elementos devido à alteração de resistência e rigidez (Correia, 2011). O reforço por perfis metálicos aplica-se nos casos em que é necessário aumentar a capacidade resistente à flexão composta e ao corte em pilares (onde é mais utilizado) e vigas, aumentar a capacidade resistente ao corte e a solidarização em paredes e aumentar a resistência ao punçoamento ou modificar o sistema estrutural de apoio em lajes (Correia, 2011).

Na Figura 6.20 pode-se observar o reforço de uma viga com perfis metálicos.



Figura 6.20 - Reforço estrutural com perfis metálicos (adaptado de Correia, 2011).

As vantagens desta técnica são a melhoria da capacidade resistente e da ductilidade da peça, a rapidez de execução e de colocação em carga da estrutura reforçada e, na maioria dos casos, a manutenção da secção existente (Correia, 2011).

Por outro lado, esta técnica apresenta as seguintes desvantagens: custo elevado, mão-de-obra relativamente especializada, necessidade de proteger todas as peças metálicas contra o fogo e a corrosão através da colocação de revestimentos exteriores de materiais adequados e pode também existir o perigo de concentração de tensões de corte nas lajes entre troços de pilares reforçados (se não for dada continuidade a esses mesmos reforços) (Correia, 2011).

### 6.3.5. Reforço por introdução de pré-esforço exterior

O reforço por pré-esforço exterior é feito por imposição de uma pós-tensão em cabos de pré-esforço exteriores ao elemento de betão armado, sendo o seu traçado escolhido de forma criteriosa. Por exemplo, em estruturas isostáticas, procura-se impor uma deformação contrária à das ações permanentes (Correia, 2011).

Os objetivos da aplicação desta técnica são o aumento da capacidade resistente do elemento de betão armado à flexão e ao corte, corrigir o comportamento em serviço quando existem flechas e fendilhação excessivas (como no exemplo da Figura 6.21) e em casos em que é necessário alterar o sistema estrutural (Correia, 2011).

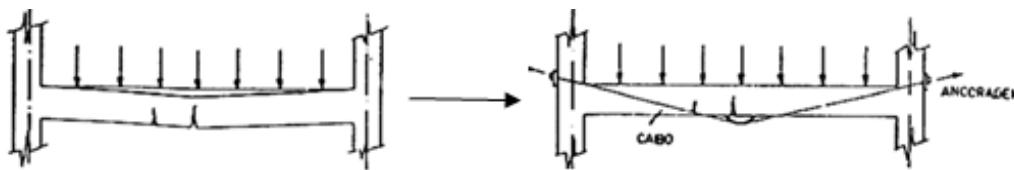


Figura 6.21 - Reforço e eliminação de deformação de uma viga (adaptado de Correia, 2011).

A maior dificuldade da técnica é a pormenorização das zonas de ancoragem onde se geram compressões elevadas na direção do pré-esforço e trações normais. É frequente a colocação de tirantes formados por barras de aço de alta resistência roscadas nas suas extremidades, encostadas às faces laterais da viga e colocadas em carga por meio de aperto de roscas que transmitem a sua tensão a dispositivos de ancoragem adequados (Correia, 2011).

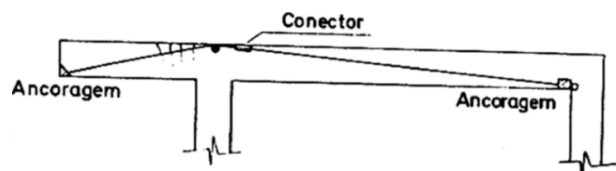


Figura 6.22 - Pré-esforço de uma consola com recurso a desviadores de direção e a um conector (adaptado de Correia, 2011).

Esta técnica apresenta como vantagens a manutenção da secção existente, rapidez e facilidade de execução e de colocação em carga da estrutura reforçada e gera forças que asseguram o equilíbrio e a resistência da estrutura ao mesmo tempo que elimina as suas deformações de carácter permanente (ao contrário de outras técnicas, em que eficácia do reforço depende de deformações adicionais da peça) (Correia, 2011).

As desvantagens são o elevado custo, a necessidade de mão-de-obra especializada, a possibilidade de criação de efeitos secundários (zonas de ancoragem e elementos adjacentes não reforçados) e a necessidade de proteger todos os cabos contra o fogo e a corrosão (Correia, 2011).

### **6.3.6. Reforço por introdução de novos elementos estruturais**

Esta solução de reforço pode incluir a introdução de elementos estruturais novos ou a demolição total e reconstrução de elementos estruturais pré-existentes. No primeiro caso, deve-se tentar que os novos elementos resistentes preencham espaços anteriormente ocupados por elementos não estruturais (paredes de alvenaria de compartimentação) de forma a não alterar a arquitetura original (Correia, 2011). No segundo caso, as dimensões da peça pré-existente poderão ou não ser mantidas consoante o grau de capacidade resistente que se pretende dar ao novo elemento, sendo preferível, do ponto de vista arquitetónico, manter as dimensões iniciais. Para isso, deve-se aumentar a classe resistente do betão ou aumentar a quantidade de armadura de reforço (Correia, 2011).

Este tipo de reforço estrutural tem como vantagens melhorar a capacidade resistente das estruturas reforçadas e o seu comportamento às ações horizontais, e permite reduzir drasticamente os esforços nos elementos pré-existentes por transmissão daqueles aos novos elementos. Como desvantagens, apresenta um elevado custo, um longo período de execução e possíveis problemas de incompatibilidade com o projeto de arquitetura inicial (Correia, 2011).

### **6.3.7. Reforço através da criação ou eliminação de ligações internas**

Esta técnica de reforço tem a particularidade de não reforçar diretamente qualquer elemento da estrutura, uma vez que não aumenta a capacidade resistente da respetiva secção (Correia, 2011). Por sua vez atua redistribuindo os esforços dos elementos estruturais mais fracos ou com problemas para os que ainda dispõem de alguma reserva na respetiva capacidade resistente, modificando a conceção estrutural inicial (Correia, 2011). Pode ser necessário complementar esta técnica com medidas de reparação como a injeção de fendas e necessitar de escoramentos provisórios para garantir o atingimento da sua máxima eficácia.

O decréscimo de capacidade resistente de determinados elementos está geralmente associado ao facto de estarem rigidamente ligados à restante estrutura ou a elementos muito mais rígidos e resistentes (Correia, 2011). Deste modo, quando se verifica a primeira hipótese a solução passa pela criação de juntas de dilatação adicionais de forma a dividir a estrutura em planta em troços menores ( $< 30$  m), o que pode implicar a duplicação de pilares e vigas de cada lado da junta. Por outro lado, quando existem elementos mais rígidos e resistentes do que outros, a criação de ligações rotuladas entre as peças mais fracas e as mais rígidas é a solução adotada (Correia, 2011).

No entanto, em algumas situações, a existência de juntas de dilatação ou de qualquer tipo de descontinuidade estrutural torna partes da estrutura excessivamente flexíveis com problemas de estado limite de deformação associados a ações verticais e horizontais. Nestes casos, a solução para reforço da estrutura passa por eliminar as juntas de dilatação (por solidarização perfeita ou mantendo alguns graus de liberdade) ou introduzindo capacidade resistente a momentos negativos onde esta não existe inicialmente (Correia, 2011).

A Figura 6.23 demonstra como se pode usar esta técnica de reforço libertando momentos que atuam numa estrutura.

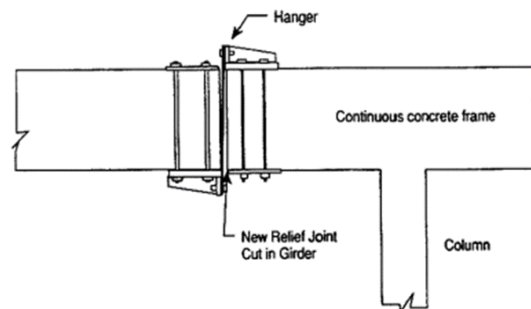


Figura 6.23 - Libertação de momentos utilizada como técnica de reforço (adaptado de Correia, 2011).

As vantagens desta técnica são as seguintes (Correia, 2011):

- Permite manter a estrutura em serviço durante a execução;
- Resolve problemas de má distribuição interna de esforços na estrutura;
- Atenua problemas de excessiva flexibilidade de alguns elementos ou partes da estrutura;
- Mantém o aspeto exterior da estrutura;
- É bastante económico na maioria dos casos e de fácil execução;
- Não obriga a mão-de-obra muito especializada.

E as suas desvantagens:

- Pequeno grau de intervenção (redistribuição de esforços é um pouco limitada para casos agudos de deficiência estrutural);
- Exige estudo adicional das consequências da modificação da conceção estrutural em todos os elementos da estrutura independentemente de necessitarem ou não de ser reforçados.

### 6.3.8. Reforço através da introdução de deslocamentos impostos

Esta técnica é baseada no princípio semelhante à técnica anterior, fazendo uma redistribuição de esforços dos elementos estruturais e originando modificações de conceção estrutural (Correia, 2011). Antes de aplicar esta técnica, e de forma a obter o melhor rendimento, é necessário analisar através de programas de cálculo automático a melhor localização do deslocamento a impor e a respetiva grandeza. O reforço da estrutura será tanto mais eficaz quanto maior for a reserva de resistência global da estrutura após a intervenção (Correia, 2011).

Esta técnica pode ser utilizada nos apoios de pontes, em sapatas de edifícios (recalce) ou no realinhamento de elementos deslocados da sua posição correta (por colapso de elementos adjacentes) (Correia, 2011).

As vantagens de utilização desta técnica são as seguintes (Correia, 2011):

- Resolve problemas de má distribuição interna de esforços na estrutura;
- Mantém o aspeto exterior da estrutura;
- É bastante económico quando comparado com outros métodos;
- É de execução relativamente fácil (quando possível).

No entanto, também apresenta as seguintes desvantagens (Correia, 2011):

- Na maioria dos casos, a estrutura tem de ser retirada de serviço durante a execução dos trabalhos;
- Utilização de mão-de-obra especializada e equipamento caro;
- Não permite grandes aumentos da capacidade resistente da estrutura;
- Necessário estudar as suas consequências em toda a estrutura podendo obrigar a reforços adicionais localizados.

## 7. AUTORREPARAÇÃO DO BETÃO

### 7.1. Introdução

A durabilidade do betão significa sobretudo a minimização da possibilidade de elementos agressivos entrarem no betão, sob determinadas condições ambientais. A fissuração é uma das principais razões para a pouca durabilidade das estruturas de betão conduzindo a uma deterioração prematura das infraestruturas. Para além de reduzir a rigidez das estruturas de betão, a fissuração pode abrir caminho à penetração de água e de substâncias agressivas provocando também a corrosão do aço, reduzindo a segurança estrutural e a facilidade de manutenção (Mihashi et al., 2012; Pacheco-Torgal et al., 2013).

Uma das formas de proteger as estruturas de betão e aumentar a sua durabilidade é utilizando materiais impermeabilizantes, de modo a impedir a entrada de agentes agressivos para o seu interior. No entanto, os tratamentos mais comuns utilizam resinas epoxídicas, silicone, acrílicos, poliuretanos, entre outros, que apresentam algum tipo de toxicidade (Pacheco-Torgal et al., 2013).

Assim, surge a necessidade de se encontrarem materiais com a capacidade de autorreparação e com baixa toxicidade de forma a aumentar a durabilidade do betão permitindo a redução de trabalhos de reabilitação, bem como uma redução dos custos associados e das emissões de gases com efeito de estufa, nomeadamente no fabrico de cimento.

Os primeiros estudos sobre a autorreparação do betão surgiram na década de 90, no entanto, a investigação sobre autorreparação em materiais à base de polímeros só despertou uma maior atenção após a publicação de White et al. (2001) sobre esse tema.

Nos últimos anos foram realizados vários estudos sobre este tema tendo gerado algumas técnicas inovadoras para dotar materiais compósitos com propriedades de autorreparação e melhorar a sua eficiência.

### 7.2. Autorreparação com recurso à utilização de cápsulas ou fibras ocas contendo agentes químicos

Este mecanismo de autorreparação recorre a cápsulas ou fibras ocas frágeis contendo agentes químicos de reparação que são misturados com o betão. O conteúdo destes agentes é libertado no betão preenchendo as fissuras originadas pela retração do betão ou por ações externas. Em 2011 um estudo teve o objetivo de verificar o desempenho de compósitos de cimento reforçados com microfibras de carbono e dois tipos de cápsulas, umas contendo um catalisador (trietilborano) e outras contendo um agente reparador (metacrilato de metilo). As cápsulas foram colocadas juntamente com as microfibras de carbono em argamassa de cimento fresco (Yang et al., 2011).

Na figura 7.1 pode-se verificar o processo de autorreparação que se inicia quando a fenda rompe as microcápsulas e o agente de reparação e o catalisador são libertados para o interior da fenda por ação capilar. Segue-se o processo de polimerização do agente de reparação ao entrar em contacto com o catalisador provocando o fecho das fissuras (Yang et al., 2011).

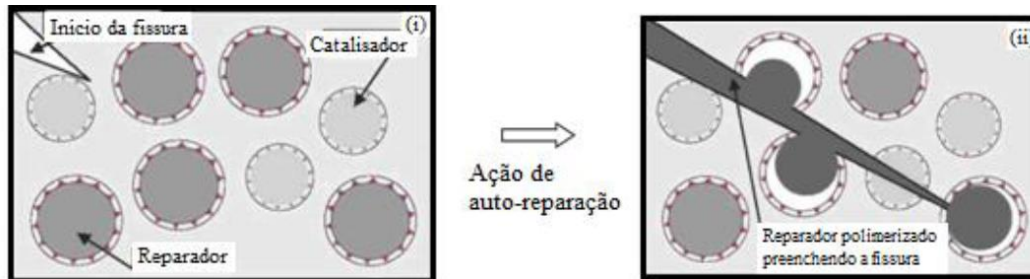


Figura 7.1 - Processo de autorreparação do betão através de microcápsulas (Pacheco-Torgal et al., 2013).

O estudo evidenciou também que este compósito de cimento quando é submetido a um esforço de compressão inferior a 80% da resistência máxima, apresenta uma redução de cerca de 70% da permeabilidade aos 30 dias. Observou-se ainda que o uso dos dois tipos de cápsulas melhora a resistência à fissuração e leva ao aumento da tenacidade (Yang et al., 2011).

Um outro ensaio laboratorial utilizou microcápsulas contendo 2% de silicato de sódio. Nessa pesquisa o betão foi carregado até próximo da rutura e após uma semana sem carregamento, recuperou cerca de 26% da sua resistência original, enquanto que o betão sem nenhum mecanismo de autorreparação apenas recuperou cerca de 10% da resistência inicial (Gomes et al., 2013).

A utilização de fibras ocas com selante foi realizada por Dry (2000) sob a parte superior de dois tabuleiros de uma ponte com a finalidade de reparar as fissuras de retração.

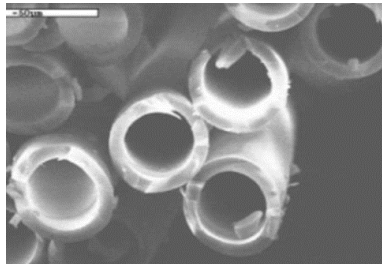


Figura 7.2 - Aspeto das fibras ocas de vidro (Pacheco-Torgal et al., 2013).

Após um mês de observações à estrutura, verificou-se que a maioria das fibras ocas quebraram devido à retração criando juntas de reparação, como se pode observar na Figura 7.3, evidenciando uma linha transversal de fissuras reparadas (área mais escura).

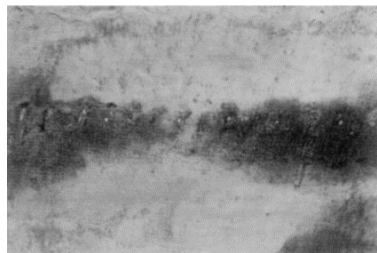


Figura 7.3 - Foto da junta de reparação criada pela libertação de selante dos tubos totalmente embutidos no betão (Pacheco-Torgal et al., 2013).

Existe ainda um outro sistema de autorreparação que implica a intervenção humana, designado por sistema de autorreparação ativa. Este sistema foi testado por Joseph et al. (2007) utilizando o cianoacrilato de etilo como agente de reparação colocado em tubos curvos de plástico.

No interior de uma matriz cimentícia foram colocadas fibras ocas, com uma das extremidades selada e a outra ligada ao sistema de abastecimento do agente de reparação. Assim, quando ocorre uma fenda liberta-se a quantidade necessária de agente reparador. Concluiu-se que este sistema de autorreparação era eficaz e foi capaz de penetrar numa área significativa das superfícies das fissuras sob a influência das forças de sucção de capilaridade e gravidade (Gomes et al., 2013).

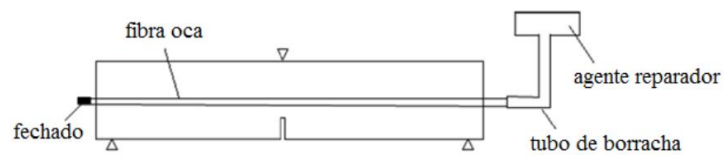


Figura 7.4 - Representação esquemática do sistema de abastecimento externo contendo o agente de reparação (Pacheco-Torgal et al., 2013).

Mais tarde, em 2010, Joseph et al., utilizaram tubos de vidro selados em ambas as extremidades com cianoacrilatos e concluíram que apenas uma pequena quantidade de agente de reparação foi libertado e que a maior parte deste permaneceu no interior dos tubos, possivelmente devido às forças de pressão criadas pelo selante em ambas as extremidades dos tubos.

Em resumo, as vantagens e desvantagens dos sistemas de autorreparação de materiais de base cimentícia apresentam-se de seguida (Pacheco-Torgal et al., 2013).

### **Utilização de cápsulas**

Vantagens:

- O agente de reparação é libertado apenas quando necessário;
- Possível eficácia em vários eventos de danos e em diferentes locais.

Desvantagens:

- Dificuldade na preparação e no lançamento das cápsulas para a matriz;
- Quantidade limitada de agente de reparação;
- A aderência entre as cápsulas e a matriz é uma preocupação;
- Aumento da porosidade do betão reduzindo a resistência mecânica do mesmo.

### **Utilização de fibras ocas**

Vantagens:

- Libertação do agente de reparação quando necessário;
- Disponível uma quantidade média de agente de cura;
- Possível eficácia em vários eventos de danos;

- Possível redução da permeabilidade à água;
- Possível melhoria da resistência do betão.

Desvantagens:

- Dificuldade no lançamento das fibras para a matriz;
- Dificuldade de libertação do agente de reparação, devido aos efeitos de sucção;
- Possível efeito negativo sobre as propriedades mecânicas da matriz de cimento, se demasiadas fibras ocas adotadas;
- Probabilidade elevada das fibras ocas quebrarem na fase da betonagem;
- Aumento da porosidade do betão reduzindo a sua resistência mecânica.

### **Utilização do sistema de abastecimento externo**

Vantagens:

- Libertação do agente de reparação quando necessário e em quantidade ajustável;
- Eficácia sob diversos tipos de danos;
- Elimina os efeitos de sucção das extremidades fechadas, não deixando que a maior parte do agente reparador permaneça no interior dos tubos;
- Possível melhoria da resistência do betão.

Desvantagens:

- Possível efeito negativo sobre as propriedades mecânicas da matriz de cimento, se forem colocadas demasiadas fibras ocas;
- Como o agente de reparação tem de ser fornecido para dentro do reservatório, esta técnica não pode ser totalmente considerada como autorreparação.

### **7.3. Autorreparação por hidratação posterior**

A reparação de fendas no betão pode ser solucionado através da autorreparação autónoma do próprio betão em que o dano em si é o estímulo para a autorreparação. Os betões, principalmente aqueles com baixa razão água/cimento, contêm no seu interior partículas de cimento não hidratadas uniformemente distribuídas, cuja hidratação posterior poderá levar à redução das fissuras entretanto formadas. A cristalização do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) no interior da fissura é a principal causa pela autorreparação autónoma do betão, embora limitada a fissuras com uma largura reduzida (Li & Yang, 2007; Pacheco-Torgal et al., 2013).

Algumas investigações evidenciaram que os betões reforçados com fibras apresentam uma capacidade de autorreparação muito superior em relação aos betões correntes pois conseguem que as fissuras mantenham uma largura muito reduzida permitindo o seu posterior preenchimento com carbonato de cálcio (Pacheco-Torgal et al., 2013). As fibras também podem

funcionar como núcleos de precipitação do carbonato de cálcio contribuindo para o reforço da capacidade de autorreparação do betão (Pacheco-Torgal et al., 2013). Desta forma, surgem os betões de ductilidade ultraelevada reforçados com fibras, designados por ECC (Engineered Cementitious Composites).

Estes betões são constituídos por uma razão de água/cimento reduzida e por um volume de fibras inferior a 2%. Caracterizam-se, ainda, por uma elevada ductilidade de deformação e fendas estreitas com largura em torno de  $60\mu\text{m}$ , a qual é muito menor que a largura de fenda típica observada em betão armado e betão reforçado com fibra normal (Pacheco-Torgal et al., 2013).

A curva de tensão-deformação resultante quantifica o comportamento mecânico do material sob carga. Quando sujeitos a um esforço de tração, enquanto o betão normal é caracterizado por uma extensão máxima de 0,01%, os betões de ductilidade ultraelevada, ECC, podem apresentar extensões entre 3 a 5% (Pacheco-Torgal et al., 2013).

Na Figura 7.5 é possível comparar o desempenho de um pilar de betão corrente (a) com um pilar de betão de ductilidade ultraelevada (b) quando sujeitos a uma ação mecânica horizontal semelhante à ação sísmica. O pilar de betão corrente perde uma parte substancial de betão, enquanto que o pilar de ECC mantém uma capacidade resistente inicial muito maior embora apresente microfissuras (linhas a marcador vermelho e verde) (Pacheco-Torgal et al., 2013).

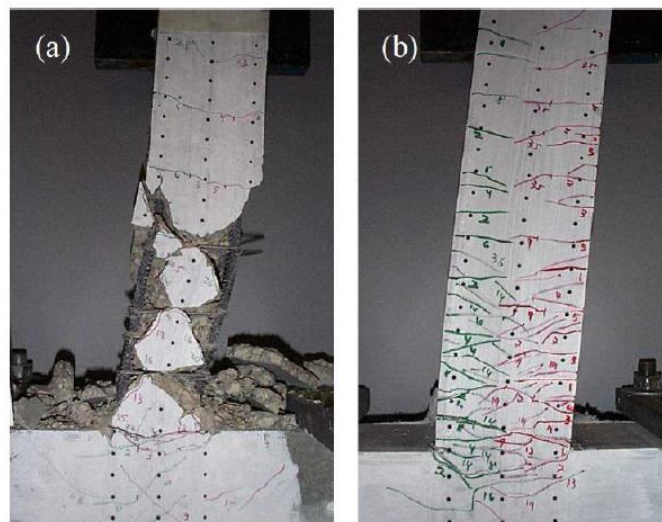


Figura 7.5 - Pilares de betão após ensaio mecânico semelhante ao que pode ocorrer durante um sismo (adaptado de Pacheco-Torgal et al., 2013).

A Figura 7.6 comprova que uma amostra de ECC pode estar sujeita a autorreparação. A amostra em questão foi previamente carregada e danificada e sofreu autorreparação das suas microfissuras quando exposta a ciclos de molhagem e secagem em laboratório. O processo de reparação identificado microscopicamente revela que novos produtos químicos se formaram na superfície da ponte de fibras dentro da fenda, assim como nas faces desta (Pacheco-Torgal et al., 2013; Yang et al., 2011).

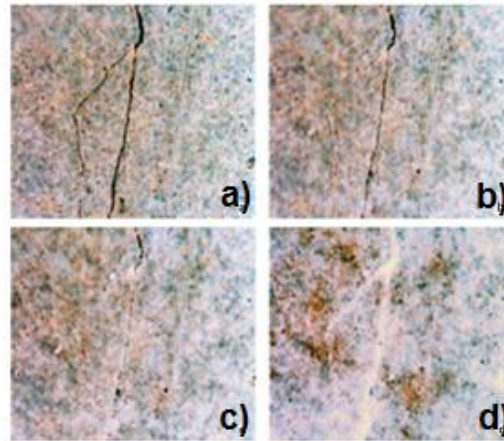


Figura 7.6 - Fotografias em lapsos de tempo (a-d) exibem uma amostra de ECC passando por autorreparação (adaptado de Pacheco-Torgal et al., 2013).

Os investigadores concluíram que estes produtos químicos tiveram origem numa mistura de hidrato de silicato de cálcio e bicarbonato de cálcio, formados quando a água e o ar (transportando o CO<sub>2</sub>) entraram nas microfissuras e reagiram com os iões de cálcio lixiviados no ECC. Com o tempo, os produtos químicos selaram completamente a microfissura (Pacheco-Torgal et al., 2013).

Alguns investigadores (Yang et al., 2009) estudaram a capacidade de autorreparação dos ECC após terem sido submetidos a ciclos de molhagem e secagem indicando que estes conseguem recuperar quase 100% da ductilidade inicial, desde que as larguras da fenda sejam inferiores a 50µm. Verificaram também, que a maioria dos produtos produzidos na autorreparação são característicos de cristais de carbonato de cálcio, correspondendo ao resíduo branco presente ao longo das linhas das fissuras tal como é possível observar na Figura 7.7.

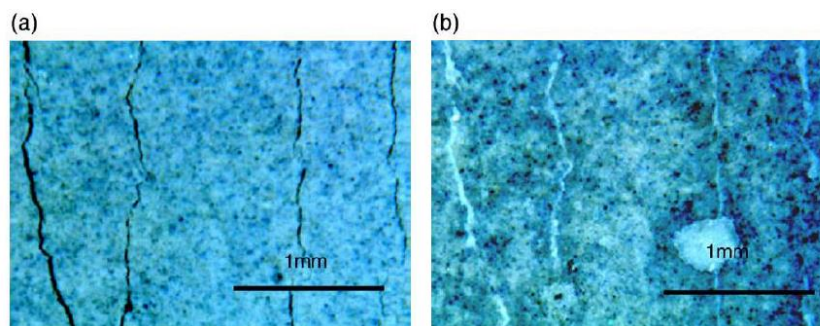


Figura 7.7 - Microfissuras no ECC, antes (a) e depois (b) da autorreparação (Pacheco-Torgal et al., 2013).

Este tipo de autorreparação apresenta como vantagens o facto de esta vertente ser a mais económica e eficaz ocorrendo uma reparação sem a adição de componentes funcionais. Por outro lado, esta técnica está limitada a fissuras de largura reduzida e o ambiente a que o material se encontra exposto é um fator a ter em consideração (Gomes et al., 2013). Quanto aos betões de ductilidade ultraelevada, as vantagens da sua utilização são idênticas às apresentadas anteriormente para a hidratação posterior do betão, conseguindo também bons resultados quando aplicados em obras em zonas de elevada sismicidade (Gomes et al., 2013). Apresentam também uma redução do impacto ambiental, redução do consumo de cimento diminuindo a libertação de

CO<sub>2</sub>. Este tipo de autorreparação está limitada a fissuras com uma largura reduzida (cerca de 60µm), sendo esse aspeto a sua principal desvantagem (Gomes et al., 2013).

#### 7.4. Autorreparação com recurso a bactérias

Na autorreparação do betão com recurso a bactérias desencadeia-se um fenómeno pelo qual as bactérias levam à formação de minerais, sendo conhecido como biomineralização. Um dos minerais precipitados por este fenómeno é o carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) precipitado, que é obtido através da decomposição da ureia por bactérias urolíticas. Neste processo também é produzido o amónio que é um agente poluente do meio ambiente (Pacheco-Torgal et al., 2013).

A aplicação das bactérias pode ser efetuada como tratamento superficial do betão ou inseridas na sua composição como um aditivo (Pacheco-Torgal et al., 2013). Na generalidade dos estudos efetuados as bactérias urolíticas utilizadas foram do género *Bacillus* para a produção de minerais de carbonato de cálcio. O pH elevado do betão dificulta o crescimento de bactérias *Bacillus pasteurii*, obtendo-se os melhores resultados quando o pH é de cerca de 9. No entanto esta bactéria usada como aditivo no betão tem uma influência positiva sobre o desempenho das composições de cimento, nomeadamente para a reparação de fissuras. A bactéria *Bacillus sphaericus* apresenta melhores resultados em betões com pH igual a 8 comparativamente à bactéria referida anteriormente (Pacheco-Torgal et al., 2013).

Devido à produção excessiva de amoníaco associada à utilização de bactérias do género *Bacillus*, outros autores levaram a cabo um estudo com esporos bacterianos do tipo *Bacillus conhii*. No entanto, foram relatadas perdas de bactérias devido à diminuição contínua do diâmetro dos poros à medida que vai progredindo a hidratação do cimento. A fim de evitar a perda de bactérias, estes autores sugerem a sua encapsulação, antes da adição à mistura de betão, ou a utilização de agentes de entrada de ar de forma a manter as bactérias ativas (Jonckers et al., 2010; Pacheco-Torgal et al., 2013).

A durabilidade de betões (considerando parâmetros como a carbonatação, difusão de cloretos e gelo-degelo) para superfícies tratadas com culturas de bactérias apresentam uma redução da permeabilidade e um desempenho semelhante entre o tratamento com bactérias e os materiais impermeabilizantes convencionais (Pacheco-Torgal et al., 2013).

Na Figura 7.8 apresenta-se uma representação esquemática da produção de CaCO<sub>3</sub> por intermédio de bactérias urolíticas. Em (A) após adição de ureia à bactéria, libertam-se carbono inorgânico dissolvido (DIC) e amónia (AMM) para o microambiente da bactéria. Em (B) o fenómeno anterior conjugado com a presença de iões de cálcio leva à supersaturação e início da precipitação de carbonato de cálcio na parede celular bacteriana. Por fim, em (C), depois de um tempo, ocorre o encapsulamento da bactéria (Pacheco-Torgal et al., 2013).

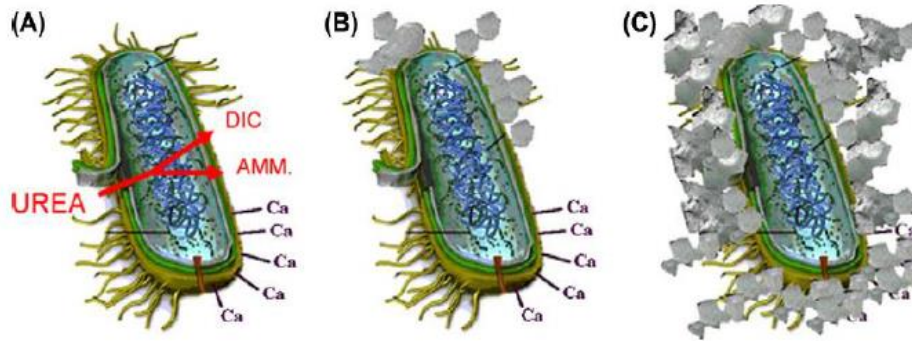


Figura 7.8 - Representação esquemática da produção de carbonato de cálcio por bactérias urolíticas (Pacheco-Torgal et al., 2013).

Esta técnica de autorreparação apresenta como vantagens (Pacheco-Torgal et al., 2013):

- Atividades biológicas de uma maneira livre de poluição e natural;
- Redução da permeabilidade;
- Redução da absorção de água.

E como desvantagens (Pacheco-Torgal et al., 2013):

- Restrição do crescimento das bactérias devido ao alto ambiente alcalino do betão;
- O tempo de vida das bactérias em betão é muito mais curto do que a vida útil de serviço dos edifícios e infraestruturas;
- A produção de amoníaco aumenta o risco de corrosão da armadura e é um poluente que contribui para vários problemas ambientais.

### 7.5. Considerações finais sobre o tema

A incorporação de cápsulas ou fibras ocas contendo agentes químicos na autorreparação de betões suscita alguma controvérsia em relação à sua utilização, apesar das investigações mais recentes sobre esta técnica serem bastante promissoras. O principal problema debate-se com o facto de ser necessário utilizar cápsulas ou fibras ocas bastante frágeis e de estas aumentarem a porosidade do betão, impedido assim que esta técnica seja muito aplicada na construção.

A utilização de betões de ductilidade ultraelevada reforçados com fibras é o caso de maior sucesso em autorreparação por hidratação posterior. Este tipo de betão tem uma razão água/cimento reduzida e um volume de fibras inferior a 2%, e revela-se bastante promissor pois possui uma elevada capacidade de autorreparação por hidratação posterior conseguindo impedir que as fissuras não excedam 60µm mesmo no caso de elevadas deformações.

O campo de aplicação maioritária deste betão são as infraestruturas viárias como pontes e estradas, embora também já seja utilizado em edifícios. O custo inicial supera o custo dos betões correntes, no entanto a sua utilização torna-se mais vantajosa devido ao aumento da durabilidade proporcionando uma menor necessidade de obras de conservação e manutenção.

A utilização de bactérias para a autorreparação do betão é um processo natural associado a uma precipitação mineral que ajuda a preencher os microporos e fissuras levando a uma redução da sua permeabilidade. As investigações até agora efetuadas relativamente a este tipo de autorreparação focaram-se essencialmente na durabilidade e menos sobre as propriedades mecânicas. Tal como a incorporação de fibras ocas, esta técnica ainda se encontra em fases de investigação mais aprofundada, estando assim longe de ser muito utilizada no sector da construção.

Apesar de terem sido apresentadas anteriormente algumas das técnicas de autorreparação do betão, ainda existem investigações e estudos a serem desenvolvidos hoje em dia sobre estas e outras técnicas. É uma área da engenharia civil em constante desenvolvimento em colaboração com outras disciplinas de forma a aumentar o conhecimento sobre as técnicas de autorreparação do betão com vista à obtenção de estruturas com maior durabilidade e menores custos de conservação e manutenção.



## 8. ESTUDO DE CASO

O objetivo deste capítulo é fazer um estudo prático de alguns assuntos abordados nos capítulos anteriores. Assim, irá ser feita uma breve caracterização de um edifício de comércio e serviços através de fichas de avaliação do estado de conservação do edifício, seguindo-se um levantamento das patologias no betão armado através de fichas de inspeção. Foram elaboradas duas fichas de inspeção, sendo a primeira designada por Ficha de Inspeção A (que se apresenta em anexo – Anexo I) que tem como objetivo recolher e documentar as informações mais importantes sobre o edifício, nomeadamente a localização do edifício (morada, freguesia, concelho e distrito), o ano de construção, o número de pisos, o tipo de utilização do edifício (habitação, comércio ou serviços, por exemplo) e o local de implantação. Nesta ficha também são recolhidas informações sobre a tipologia da estrutura resistente, das paredes exteriores e seus materiais e o tipo de revestimentos utilizados nessas paredes.

A segunda ficha de inspeção designa-se por Ficha de Inspeção B (que se apresenta em anexo – Anexo I) e pretende identificar cada uma das patologias detetadas no edifício, assim como as suas possíveis causas ou origens. Contém também uma foto da patologia, a sua localização e uma breve descrição da anomalia. O objetivo da recolha dos dados do edifício e das patologias é o de propor métodos de reparação através da elaboração de fichas de reparação para cada uma das patologias encontradas. Na Ficha de Reparação (que se apresenta em anexo – Anexo A), para além da proposta de reparação da patologia, também se irá indicar a extensão da intervenção (localizada ou total, por exemplo) e qual o grau de dificuldade da execução da reparação.

### 8.1. Caracterização do edifício

#### 8.1.1. Localização

O edifício localiza-se no perímetro urbano da cidade de Alverca, no concelho de Vila Franca de Xira e distrito de Lisboa. O edifício está isolado dos restantes edifícios circundantes, estando a sua fachada principal orientada a Noroeste, como se pode verificar na Figura 8.1.



Figura 8.1 - Localização do edifício em estudo [Fonte: Google Maps].

### **8.1.2. Descrição geral do edifício**

O edifício foi construído no início dos anos 90 do século passado, tendo sido inaugurado a 23 de Novembro de 1993, abrindo as portas ao público com lojas de comércio e serviços. O edifício é constituído pelo piso 0 onde funciona um hipermercado e algumas lojas de comércio e o piso 1 onde estão instalados armazéns e zonas de escritórios e serviços. Acima destes pisos, estão situados ainda mais 3 pisos de dimensão inferior aos anteriores mas que não estão a ser utilizados. Abaixo do solo estão situados três pisos destinados a estacionamento de viaturas e um piso que funciona como armazém. A comunicação entre os vários pisos efetua-se através de escadas, tapetes rolantes e ascensores. Por motivos de segurança e confidencialidade, não foi possível recolher as peças escritas e desenhadas do projeto original do edifício.

No interior o edifício não apresenta anomalias visíveis devido aos trabalhos de manutenção regulares levados a cabo ao longo dos últimos anos. No entanto, a zona dos parques de estacionamento apresenta algumas patologias que necessitam de ser corrigidas. No exterior do edifício é possível verificar a presença de algumas patologias, sobretudo nos muros de suporte junto à estrada nacional 10 e na zona das escadas de acesso ao piso de escritórios. A maioria das estruturas do edifício são em betão armado apenas revestido com pinturas. Em algumas zonas no interior existem paredes construídas em blocos de betão e com alguns revestimentos de azulejos.

A Ficha de Inspeção A preenchida com os dados do edifício em estudo encontra-se no Anexo IV.

### **8.1.3. Estado de conservação do edifício**

Para o levantamento do estado de conservação do edifício procedeu-se à inspeção de todo o edifício por forma a preencher a ficha de avaliação do estado de conservação do edifício que foi elaborada de acordo com o Método de Avaliação do Estado de Conservação dos Edifícios (MAEC), desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Este método faz a avaliação da estrutura do edifício e das suas infraestruturas determinando o índice de anomalias do edifício que corresponde ao respetivo estado de conservação do edifício.

A ficha de avaliação do estado de conservação do edifício em estudo encontra-se no Anexo II. A ficha já preenchida encontra-se no Anexo VI.

## **8.2. Identificação e caracterização das patologias**

Como foi referido anteriormente, o edifício apresenta anomalias nas estruturas de betão armado nas zonas de estacionamento, nos muros de suporte e na zona das escadas. Durante a inspeção ao edifício foi realizado um registo fotográfico dessas anomalias. Para cada uma das anomalias foi elaborada a respetiva Ficha de Inspeção que contém a descrição e a localização da anomalia no edifício, a sua gravidade e extensão, as causas ou origens prováveis e ainda uma fotografia da patologia.

Por fim foi também preenchida uma Ficha de Reparação onde se propõe um método de reparação para cada uma das patologias identificadas nas fichas de inspeção.

As fichas de inspeção e reparação atrás referidas e preenchidas encontram-se nos Anexos IV (Fichas de Inspeção) e V (Fichas de Reparação).

### 8.2.1. Patologias no betão armado

Depois da visita e análise das patologias existentes nas estruturas de betão armado foram identificadas as principais patologias que se repetem em várias zonas do edifício. De seguida irá ser feita a caracterização dessas patologias.

#### 8.2.1.1. Infiltrações

##### Caracterização da patologia:

As infiltrações são um tipo de patologia em que a água atravessa uma determinada superfície permeável, deixando húmido ou molhado o seu interior. As infiltrações de água são das anomalias mais graves no que respeita à manutenção e conservação do bom estado do edifício. É necessário identificar de forma correta as suas causas e origens e corrigir os problemas de forma eficaz. Esta patologia pode ser de difícil identificação, sobretudo quando há danos nas redes de águas embutidas nas estruturas.

##### Localização da patologia:

Este tipo de patologia foi identificado no edifício em dois locais distintos. Uma das zonas é numa parede do parque de estacionamento (Figura 8.2) e na zona exterior do edifício, nomeadamente nas escadas de acesso ao piso de escritórios (Figura 8.3).



Figura 8.2 - Infiltrações na parede do parque de estacionamento (Fonte: Autor).



Figura 8.3 - Infiltrações na zona das escadas (Fonte: Autor).

##### Causas da patologia:

As infiltrações visíveis no parque de estacionamento são devido a uma rotura na rede de esgotos que passa dentro daquela parede, um pouco acima da conduta de ventilação que se pode verificar na Figura 8.2. No caso da infiltração nas escadas, a sua origem deve-se à elevada

fendilhação existente devido ao desligamento do betão e da alvenaria das escadas possivelmente devido a movimentos de origem térmica, bem como devido ao assentamento do terreno.

### 8.2.1.2. Humidades Ascensionais

#### Caracterização da patologia:

As humidades ascensionais ocorrem geralmente em paredes interiores e exteriores e também em pavimentos de pisos térreos e são caracterizadas pela subida da água por capilaridade através dos elementos construtivos. A altura que a água pode atingir no elemento depende das condições climáticas como a temperatura e a humidade relativa, da espessura da parede (quanto maior a espessura, maior a altura atingida pela água) ou da porosidade dos materiais, uma vez que a água atinge uma maior altura quanto menor for o diâmetro dos poros. Este tipo de patologia é identificado pelas manchas que aparecem nas paredes denunciando a presença de água. A ascensão da água também pode transportar sais que irão cristalizar durante a evaporação da água podendo também verificar-se a ocorrência de eflorescências ou criptoflorescências.

#### Localização da patologia:

Esta patologia verifica-se essencialmente nos muros de suporte (Figura 8.4) junto à saída dos parques de estacionamento exteriores. Estes muros de suporte têm como função suportar as terras junto à via de acesso ao edifício.



Figura 8.4 - Manchas de humidade nos muros de suporte (Fonte: JR)

#### Causas da patologia:

A causa desta patologia prende-se com o facto dos paramentos térreos estarem em contacto com a água. Neste caso, o muro de suporte encontra-se junto a uma sarjeta que faz a recolha de águas pluviais que sofreu algumas obras de remodelação nos últimos anos por deficiente escoamento da água. Ainda assim existe sempre uma acumulação de água naquela zona quando chove. Outra das causas prováveis é a infiltração de água do lado exterior do muro, junto à estrada nacional.

### 8.2.1.3. Eflorescências e Criptoflorescências

#### Caracterização da patologia:

As eflorescências e criptoflorescências manifestam-se devido à presença de humidade e à existência de sais solúveis no revestimento, no suporte ou transportados pela água. Estas patologias são caracterizadas pela deposição e cristalização de sais quando a água evapora e é identificável pelo aparecimento de uma substância esbranquiçada. Quando este fenómeno ocorre na superfície do revestimento é designado de eflorescência e de criptoflorescência quando a cristalização ocorre no interior do paramento, normalmente entre o suporte e o revestimento, criando um empolamento no revestimento devido ao aumento de volume dos sais.

#### Localização da patologia:

Esta anomalia pode ser encontrada nas paredes e nos pilares dos pisos de estacionamento que estão junto à parede e á vedação metálica que delimitam o edifício do exterior, como se pode verificar nas Figuras 8.5, 8.6 e 8.7.



Figura 8.5 - Eflorescências e criptoflorescências nos pilares no piso -1 (Fonte: Autor).



Figura 8.6 - Eflorescências e criptoflorescências nos pilares do piso -2 (Fonte: Autor).



Figura 8.7 - Criptoflorescências nas paredes dos pisos de estacionamento (Fonte: Autor).

#### Causas da patologia

A ocorrência desta patologia poderá ter origem nos sais transportados pela água da precipitação que transportada pelo vento chega até aos elementos afetados. Como se pode ver nas

Figuras 8.5 e 8.6, os pilares estão muito perto da vedação pelo que estão sujeitos a ciclos de molhagem e secagem em tempos de chuva. Na Figura 8.7 pode-se verificar que a parede tem salpicos de óleos que são transportados pela água durante a passagem dos veículos junto às paredes.

A vedação metálica que foi colocada na parte superior da parede tem a função não só de vedar o espaço mas também o de deixar entrar a luz natural. No entanto em dias de chuva não protege os restantes elementos que estão junto a essa área. Os elementos afetados por esta patologia já evidenciam bastantes áreas com destacamentos dos revestimentos (pinturas).

Os pilares mais afastados desta zona de vedação não manifestam esta patologia.

#### 8.2.1.4. Destacamento do betão

##### Caracterização da patologia:

O destacamento de partes do betão num elemento estrutural pode estar relacionado com a oxidação das armaduras sobretudo devido ao fenómeno da carbonatação. Quando o dióxido de carbono consegue penetrar no betão e chegar às armaduras inicia-se o mecanismo de corrosão do aço. Os produtos da corrosão expandem e provocam fissuração no betão e nos casos mais graves ocorre a delaminação do betão.

##### Localização da patologia:

Este tipo de anomalia verifica-se em alguns pilares nos pisos de estacionamento do edifício, denotando-se com maior gravidade no pilar ilustrado na Figura 8.8.



Figura 8.8 - Destacamento de betão num pilar do piso -2 (Fonte: Autor).

##### Causas da patologia:

As causas mais prováveis desta anomalia é a carbonatação do betão que, como foi dito anteriormente, provoca a expansão dos produtos da corrosão das armaduras e provoca a delaminação do betão. Podemos estar perante uma fase inicial do problema uma vez que ainda não são visíveis as armaduras. No entanto o pilar apresenta fissuração e destacamento do betão que são sintomas comuns quando existe corrosão das armaduras por carbonatação do betão.

### 8.2.1.5. Fissuração

#### Caracterização da patologia:

A fissuração é uma das patologias que mais afeta as construções e está presente desde o início da fase de cura do betão e pode surgir em qualquer fase da vida da estrutura. Existem vários tipos de fissuração que podem ocorrer numa estrutura de betão armado como relatado no Capítulo 2 desta dissertação.

#### Localização da patologia:

Durante a inspeção ao edifício foram encontradas várias estruturas com fendas e fissurações. Nos pisos de estacionamento a fissuração é visível nas paredes (Figura 8.9) e na zona das escadas de acesso ao piso de escritórios (Figura 8.10).



Figura 8.9 - Fissuração nas paredes dos parques de estacionamento (Fonte: Autor).



Figura 8.10 - Fissuração nas escadas de acesso aos escritórios (Fonte: Autor).

A zona mais preocupante que está afetada é a dos muros de suporte que apresentam uma grande extensão com esta anomalia. Esta situação pode-se verificar nas Figuras 8.11 e 8.12.



Figura 8.11 - Fissuração visível no muro de suporte (Fonte: Autor).

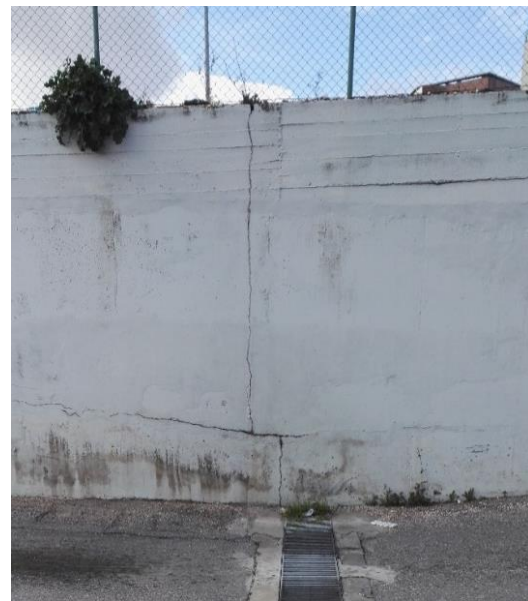


Figura 8.12 - Fissuração generalizada no muro de suporte (Fonte: Autor).

Causas da patologia:

A fissuração que se verifica na Figura 8.9 é denominada de fissuração estrutural que foi surgindo devido às cargas e aos esforços que a estrutura está submetida. Devido a esta fendilhação, ocorreu também uma rotura na rede de esgotos provocando uma infiltração na parede. Com o aumento do teor de humidade devido à infiltração, pode-se verificar a expansão de movimentações higroscópicas no interior da parede de betão provocando dilatações ou contrações do material originando tensões que agravam ainda mais a fissuração.

A fissuração na zona das escadas deve-se ao desligamento do betão com a alvenaria que pode ter uma origem térmica provocando níveis de retração diferentes nos dois materiais. A fissuração nos muros de suporte pode ser causada pelo assentamento diferencial das fundações. A zona onde está fundado o edifício apresenta alguns problemas em termos da qualidade dos terrenos, uma vez que é considerada zona pantanosa devido à proximidade do rio Tejo.

### **8.3. Propostas de resolução das patologias**

Após a identificação das patologias existentes no betão armado, é necessário definir medidas corretivas dessas patologias. As propostas de resolução das patologias visam a correção do problema de forma que o mesmo não ocorra novamente e aumentar o tempo de vida da estrutura.

Por forma a que as medidas propostas sejam eficientes e duradouras é necessário que a sua execução seja feita em conformidade com os processos de aplicação indicados pelos fabricantes dos produtos adotados.

No Anexo V estão as fichas de reparação preenchidas com a proposta de resolução de cada uma das patologias identificadas nas fichas de inspeção. No Anexo III apresentam-se as fichas técnicas dos produtos propostos para a reparação das patologias.

#### **8.3.1. Fendas e Fissurações**

Para a resolução destas patologias a solução é o preenchimento das fendas e fissuras através da aplicação de argamassas de reparação.

O procedimento de reparação de fendas e fissuras é o seguinte:

- 1- Abertura das fendas e fissuras em forma de “V” utilizando os meios adequados;
- 2- Limpeza de detritos e poeiras;
- 3- Saturar a superfície do suporte (de acordo com a ficha do produto a aplicar);
- 4- Humedecer a superfície e aplicar a argamassa de reparação “Sika MonoTop-412 S” através de método manual com colher de pedreiro e talocha;
- 5- Garantir adequadas condições de cura da argamassa de reparação procedendo à molhagem da superfície regularmente.

### **8.3.2. Infiltrações**

Nas infiltrações da parede do parque de estacionamento (Figura 8.2) é necessário proceder em primeiro lugar à reparação da rede de esgotos que se encontra em rotura de forma a eliminar a infiltração. No caso da infiltração junto às escadas de acesso aos escritórios (Figura 8.3), a passagem da água acontece devido à fissuração existente, pelo que, é fundamental proceder à eliminação da fissuração pelo método referido no ponto anterior.

Na parte inferior da escada, onde se verifica a existência de escorrência de água na zona da junta de betonagem, por forma a eliminar completamente o acesso da água entre a escada e a parede deve-se aplicar mástique monocomponente à base de poliuretano, de baixo módulo de elasticidade para selagem elástica de juntas, com características resistentes à exposição ao meio ambiente.

O produto proposto é o mástique “Sikaflex 11 FC+” e para a sua correta aplicação é necessário garantir que a base se encontra limpa e seca, garantindo a aderência do produto. Antes da aplicação de mástique é necessário aplicar um primário de aderência devido a estarmos perante uma base porosa. O primário recomendado é o “Sika Primer 3N”. Depois da aplicação do primário deve-se esperar pelo menos 30 minutos até iniciar a aplicação do mástique sendo importante assegurar que este fica completamente em contato com ambos os lados da junta, garantindo a sua estanquidade.

### **8.3.3. Humidades Ascensionais, Eflorescências e Criptoflorescências**

Para a correção destas patologias a proposta de reparação consiste na execução de uma impregnação hidrofóbica cujo objetivo é tratar o betão de forma a obter uma superfície repelente à água. Nessa situação, os poros e a rede capilar do betão não estão preenchidos mas revestidos com o material hidrofóbico permitindo a redução da tensão superficial da água e prevenindo a sua passagem através dos poros, sem deixar de permitir a difusão do vapor de água.

Dos produtos existentes no mercado, recomenda-se a utilização do “Sikagard 700 S”. O suporte deve apresentar-se livre de poeiras, óleo, eflorescências e qualquer revestimento ou pintura, sendo que a limpeza da superfície deverá ser efetuada através de escovagem e lavagem com detergente neutro, ou em alternativa, poderá efetuar-se uma lavagem com jato de água.

No caso dos pilares dos pisos -1 e -2 que estão afetados por eflorescências e criptoflorescências outra proposta de resolução do problema é o encerramento da área aberta na parede que está apenas delimitada pela vedação metálica por forma a impedir o acesso das águas das chuvas transportadas pelo vento aos elementos de betão armado.

### **8.3.4. Destacamento do betão**

Nos pilares que apresentam áreas com destacamentos do betão a solução corretiva é repor a forma inicial do pilar através do enchimento com argamassa de reparação as zonas com falta de

betão. Deste modo, aconselha-se a utilização da argamassa de reparação “weber.rep rapide”. Esta argamassa caracteriza-se por ter fibras na sua constituição, uma presa rápida e garante uma reparação estrutural do betão mesmo em espessuras elevadas.

O procedimento de reparação é o seguinte:

- 1- Sondar o elemento para detetar zonas de betão solto;
- 2- Deixar contornos em aresta viva nas zonas demolidas a reparar;
- 3- Limpar detritos, poeiras, vestígios de gorduras, óleo ou outros resíduos;
- 4- Caso a profundidade do betão removido atinja as armaduras, deve-se tratar as que estão oxidadas limpando cuidadosamente através de escova metálica ou jato de areia;
- 5- Aplicar o produto anticorrosão “weber.rep fer” na superfície das armaduras;
- 6- Uma hora após a aplicação do produto anticorrosão das armaduras, humedecer o suporte a revestir e colocar cofragem se necessário;
- 7- Aplicar manualmente a argamassa de reparação.

## 9. CONCLUSÕES

A construção civil atravessa um período difícil em termos de construção de novos edifícios em Portugal mas, por outro lado, assiste-se a uma crescente preocupação com o parque edificado e ao aumento das intervenções de reabilitação.

A reabilitação alberga um conjunto de operações com o objetivo de aumentar os níveis de qualidade e conforto de uma edificação, mantendo as exigências funcionais e o tempo de vida útil previsto aquando da construção.

Este trabalho teve como objetivo descrever as principais patologias do betão armado, os ensaios que se podem realizar *in situ*, a normalização existente e as técnicas de proteção e reabilitação mais utilizadas. Apresenta-se um Estudo de Caso e um conjunto de fichas técnicas: fichas de inspeção e fichas de reparação, cuja mais valia é a sistematização de recolha de dados de inspeção, e de agilização e adequada consistência na fase de reparação.

No caso das patologias, foram identificadas as principais anomalias do betão armado que surgem na fase de construção e que, maioritariamente, surgem devido a falhas que podem ser evitadas com a correta execução da betonagem, vibração e cura do betão. Outras patologias como as fissurações que podem ocorrer ao longo da vida da estrutura, são mais difíceis de controlar, como se descreve no presente trabalho.

O fenómeno da corrosão também foi estudado neste trabalho sobretudo em relação à corrosão das armaduras induzida pela carbonatação e o ataque dos cloretos. Este estudo permitiu aprofundar o conhecimento desta problemática desde o mecanismo que o origina, os fatores que influenciam o seu desenvolvimento e as suas consequências no betão armado.

No campo dos ensaios, apenas foram abordados os principais ensaios que se podem realizar *in situ* de forma a ajudar na identificação das patologias. Apesar de haver algumas patologias facilmente diagnosticáveis, os ensaios podem ajudar nos casos em que existam patologias não visíveis a olho nú.

A norma NP EN 1504, que se estudou, assume um papel importante na reabilitação das estruturas pois define princípios e métodos de reparação de forma que a reparação ou proteção de uma estrutura de betão armado se revele eficaz. As fases de processo de reparação, bem como as condições de aplicabilidade enunciados na NP EN 1504, revelam ser fáceis de compreender e aplicar.

Neste trabalho estão também reunidas várias técnicas de proteção, reforço e reparação de estruturas de betão armado que podem servir de apoio em muitas obras de reabilitação. É importante ter em conta os vários tipos de intervenções que se podem fazer numa estrutura, cabe ao responsável pela intervenção escolher a melhor opção.

A autorreparação do betão, que se descreve no presente trabalho, tem ganho cada vez mais interessados neste tema na área da Engenharia Civil, no entanto, ainda está numa fase de

muita investigação e pouca aplicação prática. As várias técnicas apresentadas neste domínio visam aumentar a durabilidade das estruturas e diminuir a necessidade de obras de manutenção. O que se pode concluir é que ainda estamos longe de haver uma aplicação destas técnicas em larga escala.

A parte prática deste trabalho consistiu na elaboração de fichas de inspeção e fichas de reparação na perspetiva de identificar patologias em estruturas de betão armado em um edifício e propor medidas corretivas dessas patologias. Entende-se que as fichas de inspeção são uma forma de organizar a informação e de fazer a caracterização do edifício, das patologias e de perceber o estado geral do edifício.

Em suma, os temas abordados neste trabalho estão todos relacionados com a reabilitação das edificações que se espera que seja um dos grandes focos da Engenharia Civil nos próximos anos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albergaria, B., *Inspeção e Reabilitação de Estruturas de Betão Armado*, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2013.
- Alves, S., *www.patorreb.com - Um contributo para a sistematização do conhecimento da patologia da construção*, Faculdade de Engenharia do Porto, 2008.
- Amaral, S., *Inspeção e diagnóstico de edifícios recentes. Estudo de um caso real*, Instituto Superior de Engenharia do Lisboa, 2013.
- Amaro, J., *Caracterização de Argamassas para Reparação de Betão*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2011.
- Andrade, C., Alonso, C., *Vida until y vida residual das estruturas de hormigon*, Seminário, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1996.
- Andrade, C. [et. al], *Manual de Inspeccion, Evaluacion y Diagnostico de Corrosion en Estructuras de Hormigon Armado*, 2ª ed., Rio de Janeiro, Brasil, 1998.
- Andrade, C., *Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras*, Editora Pini, São Paulo, Brasil, 1992.
- Appleton, J., Costa, A., *Análise da penetração de cloretos em Estruturas de Betão armado Expostas ao Ambiente Marítimo*, Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas (RPEE), n.º 46, p. 1-13, 1999.
- Bentur, A. [et. al], *Steel Corrosion in Concrete: Fundamentals and Civil Engineering Practice*, 1st ed., CRC PRESS, London, 1997.
- Bertolini, L. [et. al], *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair*, 1st ed., Wiley, 2004.
- Brito, J. [et. al], *Diagnóstico e Patologia de Construções em Betão Armado*, Instituto Superior Técnico de Lisboa, 2002
- Brito, J., *Patologias em Construções em Betão*, folhas de apoio à cadeira de Reabilitação de Construções – Estudo de casos, Curso de Mestrado em Construção, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2004.
- Broomfield, J., *Corrosion of steel in concrete: Understanding, Investigation and Repair*, 1st ed., Nova Iorque, Estados Unidos da América, 1997.
- Ceukelaire, L., Nieuwenburg, V., *Accelerated carbonation of a blast-furnace cement concrete*, Cement and Concrete Research v.23, 1993.
- Coias, V., *Inspecções e Ensaios na Reabilitação de Edifícios*, IST PRESS, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2006.

- Coito, M., *Avaliação probabilística da vida útil de estruturas de betão sob a ação da carbonatação e dos cloretos*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2008.
- Correia, J., *Potecção, reparação e reforço de estruturas de betão armado*, Introdução à Reabilitação de Edifícios Contemporâneos, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2011.
- Costa, A., *Anomalias e Mecanismos de deterioração, Módulo 2*, apontamentos da cadeira de Reabilitação e Reforço de Estruturas, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1999.
- Costa, A., *Durabilidade Estruturas de Betão*, apontamentos da cadeira de Reabilitação e Reforço de Estruturas, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2006.
- Costa, A., *Durabilidade de Estruturas de Betão Armado em Ambiente Marítimo*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1997.
- Costa, A. [et. al], *Concrete carbonation and chloride penetration in marine environment*, Concrete Science and Engineering, vol. 3, p. 242-249, 2001.
- Coutinho, M., *Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem*, 1ª ed., Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2005.
- Diamantino, T., *Corrosão e proteção de materiais*, vol. 31, n.º2, Lisboa, 2012.
- Dry, C., *Three design for the internal release of sealants, adhesives and waterproofing chemicals into concrete to reduce permeability*, Cement and Concrete Research, 2000.
- El-Reedy, M., *Steel-Reinforced Concrete Structures: Assessment and Repair of Corrosion*, Boca Raton: CRC Press, 2007.
- Fallé, J., *Identificação de problemas e Soluções em betões e argamassas hidráulicas*, Universidade Fernando Pessoa, Brasil, 2012.
- Farinha, B., *Patologias em Edifícios*, folhas de apoio à cadeira de Reabilitação de Edifícios e Monumentos, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2010.
- Fernandes, J., Montemor, F., *Corrosão: Prevenção e Proteção*”, *Ciência e Engenharia de Materiais de Construção*, 1ª ed., Lisboa, 2012.
- Ferreira, J., *Técnicas de diagnóstico de patologias em edifícios*, Faculdade de Engenharia do Porto, 2010.
- Figueiredo, E. [et. al], *Fatores determinantes da iniciação e propagação da corrosão da armadura do concreto*, Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil, 1994.
- Flores-Colen, I., *Metodologia de avaliação do desempenho em serviço de fachadas rebocadas na óptica da manutenção predictive*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2008.

- Fukushima, T., *Theoretical investigation on the influence of various factors on carbonation of concrete*, Building research Institute, Japão, 1988.
- Galvão, J., *Técnicas de ensaio in-situ para avaliação do comportamento mecânico de rebocos em fachadas*, Instituto Superior Técnico, 2009.
- Gomes, A., [et. al], *Análise de desenvolvimentos no domínio dos materiais de construção auto-reparadores*, Universidade do Minho, 2013.
- Gonçalves, A., *Composição do betão e propriedades relevantes na resistência às ações agressivas*, Seminário Prevenção da Corrosão em Estruturas de Betão Armado, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1996.
- Gonçalves, A., *Estudo da influência dos factores de aplicação no desempenho de argamassas de revestimento recorrendo a técnicas de ensaio in-situ*, Instituto Superior Técnico, 2010.
- Gonçalves, C., *Anomalias Não Estruturais em Edifícios Correntes. Desenvolvimento de um Sistema de Apoio à Inspeção, Registo e Classificação*, Universidade de Coimbra, 2004.
- Gouveia, J., *Deterioração do betão por fenómenos de carbonatação: consequências nas armaduras de edificações após 50 na cidade Lisboa*, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2010.
- Helene, P., Cunha, A., *Despassivação das Armaduras de Concreto por Acção da Carbonatação*, Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil, 2001.
- Hernández, J., *Efeito da temperatura de solubilização e da concentração de íons cloreto e sulfato sobre a resistência à corrosão por pite dos aços inoxidáveis austeníticos*, Universidade de São Paulo, Brasil, 2012.
- Jack, M., [et al], *Effects of Carbonation on Mechanical properties And Durability Of Concrete using Accelerated Testing Method*, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 10, No. 1, pp. 14-20, 1994.
- Jonkers, H., [et. al], *Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete*, Ecological Engineering, 2010.
- Juandes, L., *Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de “CFRP”*, Tese de Doutoramento, Universidade do Porto, 361 pp, 1999.
- Kazmierczak, C., *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, Brasil, 1995.
- Laje, J., *Estudo da influência da amostragem e da metodologia de colheita de betão em pó para a determinação do teor de cloretos*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2013.

- Lagerblad, B., *Carbon dioxide uptake during concrete life cycle - state of the art*, Report series of Swedish Nuclear Fuel and Waste Management CO, Suécia, 2001.
- Lagerblad, B., *Leaching performance of concrete based on samples from old concrete constructions*, CBI report, Suécia, 2005.
- Li, V., Yang, E., *Self-healing in concrete materials*. In: *Self-healing materials: an alternative approach to 20 centuries of materials science*, 2007.
- Medas, L., *Inspeção, Diagnóstico e Reparação de Estruturas de Betão Armado*, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2013.
- Meyer, A., *The importance of the surface layer for the durability of concrete structures*, In: Katherine, Bryant Mather, editors. International conference on concrete durability, Atlanta, Estados Unidos da América, 1987.
- Mihashi, H., [et. al], *Development of engineered self-healing and self-repairing concrete-State-of-the-Art Report*, Journal of Advanced Concrete Technology, 2012.
- Monteiro, I., *Modelação da evolução da carbonatação em elementos de betão armado*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2010.
- Montemor, M., [et. al], *Corrosion behaviour of rebars in fly ash mortar exposed to carbon dioxide and chlorides*, Cement & Concrete Composites, vol. 24 p. 45-53, 2002.
- Moura, D., *Deterioração e Reabilitação de Estruturas de Betão Armado*, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2012.
- Neville, A., *Propriedades do concreto*, Tradução de Salvador E. Giannusso, Editora PINI, São Paulo, Brasil, 1997.
- Nicholas, J., *Nondestructive and in place; the methods to evaluate concrete structures*, Special Sessions on Inspection and Diagnostics of Structures, REABILITAR 2010, National Laboratory of Civil Engineering (LNEC), Lisboa, 2010.
- NP EN 206-1 (2007), *Betão. Parte 1: Especificações, desempenho, produção e conformidade*, European Standard, CEN, Brussels. (versão portuguesa)
- NP EN 1992. 2010. *Eurocódigo 2 – Projeto de estruturas de betão Parte 1-1: Regras gerais e Regras para Edifícios*, Instituto Português da Qualidade, Monte da Caparica, 2010.
- NP EN 12504 – *Ensaio de betão nas estruturas – Parte 2: Ensaio não destrutivo, Determinação do índice esclerométrico*, Instituto Português da Qualidade, Monte da Caparica, 2012.
- NP EN 12504. 2012. – *Ensaio de betão nas estruturas – Parte 4: Ensaio não destrutivo, Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons*, Instituto Português da Qualidade, Monte da Caparica, 2012.

NP EN 1504-1, (2006). *Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão* – Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 1: Definições, European Standard, CEN, Brussels. (versão portuguesa)

NP EN 1504-2, (2006). *Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão* – Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 2: Sistemas de protecção superficial do betão, European Standard, CEN, Brussels. (versão portuguesa)

NP EN 1504-3, (2006). *Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão* – Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 3: Reparação estrutural e não estrutural, European Standard, CEN, Brussels. (versão portuguesa)

NP EN 1504-4, (2006). *Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão* – Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 4: Colagem estrutural, European Standard, CEN, Brussels. (versão portuguesa)

NP EN 1504-5, (2006). *Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão* – Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 5: Injecção do betão, European Standard, CEN, Brussels. (versão portuguesa)

NP EN 1504-6, (2008). *Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão* – Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 6: Ancoragem de armaduras de aço, European Standard, CEN, Brussels. (versão portuguesa)

NP EN 1504-7, (2008). *Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão* – Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 7: Protecção contra a corrosão das armaduras, European Standard, CEN, Brussels. (versão portuguesa)

NP EN 1504-8, (2006). *Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão* – Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 8: Controlo da qualidade e avaliação da conformidade, European Standard, CEN, Brussels. (versão portuguesa)

NP EN 1504-9, (2009). *Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão* – Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 9: Princípios gerais para a utilização de produtos e sistemas, European Standard, CEN, Brussels. (versão portuguesa)

NP EN 1504-10, (2008). *Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão* – Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 10: Aplicação de produtos e sistemas e controlo da qualidade da obra, European Standard, CEN, Brussels. (versão portuguesa)

Oliveira, R., *Análise de Práticas de Conservação e Reabilitação de Edifícios com Valor Patrimonial*, Faculdade de Engenharia do Porto, 2003.

- Pacheco-Torgal, F., [et. al], *Betões com capacidade de auto-reparação: Um contributo para a redução de custos de infra-estruturas*, Revista Maquinaria, 2013.
- Page, C., [et. al], *The influence of different cements on chloride induced corrosion of reinforcing steel*, Cement and Concrete Research, Vol. 16 p. 79-86, 1986.
- Parrott L., *A review of carbonation in reinforced concrete*, Cement and Concrete Association, Building Research Establishment, ed. Slough, 1987
- Pereira, J., *Avaliação da Resistência à Compressão do Betão através de Ensaio Não-Destrutivos*, Universidade de Coimbra, 1999.
- Pereira, S., Paiva, A., *Avaliação e certificação do comportamento térmico de uma habitação*, Actas do 2º Encontro sobre patologia e reabilitação de edifícios, PATORREB, 2006
- Pereira, V., *Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: Influência do tipo de cimento, da relação a/c, da temperatura e do tempo de cura* Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2001.
- Pina, J., *Efeitos Estruturais da Corrosão das Armaduras no Comportamento de Estruturas de Betão*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2008.
- Polito, G., *Corrosão em estruturas de concreto armado: Causas, Mecanismos, Prevenção e Recuperação*, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, 2006.
- Salta, M., *Introdução à corrosão do aço no betão. Modelos de comportamento às acções agressivas, Prevenção da Corrosão em Estruturas de Betão Armado*, Seminário Prevenção da Corrosão em Estruturas de Betão Armado, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1996.
- Sampaio, C., *Caracterização do betão através de técnicas não-destrutivas*, Faculdade de Engenharia do Porto, 2010.
- Santos, T., *Corrosão das Armaduras do Betão Armado, Causas, Consequências, Prevenção e Projeto de Durabilidade*, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2014.
- Saraiva, J., *Técnicas de Protecção e Reparação de Estruturas de Betão Armado*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007.
- Silva, J., *Métodos eletroquímicos para Prevenção da Deterioração e Reparação das Estruturas de betão armado: Protecção catódica, Dessalinização e Realcalinização*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007.
- Silva, P., *Comportamento de Estruturas de Betão Reforçadas por Colagem Exterior de Sistemas de CFRP*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.
- Simas, M., *Sistemas de protecção do betão face à carbonatação*, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2007.

- Sousa, J., *Inspecção e Reabilitação de Estruturas Segundo a NP EN 1504 – Caso de Obra*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.
- Thomas, M. D. A., [et al], *Alkali-Silica reactivity Field Identification Handbook*, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2011.
- Uomoto, T., Takada, Y., *Factor affecting concrete carbonation rate- Durability of Building Materials and Components*”, Japão, 1993.
- Varela, R., *Corrosão das armaduras em Betão armado: Influência dos agentes cloretos e da carbonatação nas Edificações de Cabo Verde*, Universidade Jean Piaget de Cabo Verde, 2010.
- Vénuat, M., Alexandre, J., *De la carbonatation des bétons*, CERILM, Publicação n.º195, 30 p, França, 1969
- Vesikari, E., *Carbonation and Chloride Penetration in Concrete with Special objective of Service Life Modelling by the Factor Approach*, Technical Research Centre of Finland (VTT), 2009.
- Yang, Z., [et. al], *A self-healing cementitious composite using oil core/silica gel shell microcapsules*, Cement and Concrete Composites, 2011.



## **ANEXOS**



## **Anexo I – Fichas de Inspeção e Ficha de Reparação**



# FICHA DE INSPEÇÃO: A

## IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO

### 1. Dados gerais do edifício

Morada: \_\_\_\_\_

Freguesia: \_\_\_\_\_

Concelho: \_\_\_\_\_

Distrito: \_\_\_\_\_

### 2. Caracterização do edifício

Ano de construção: \_\_\_\_\_

Nº de pisos: \_\_\_\_\_

Nº de Frações: \_\_\_\_\_

Utilização do Edifício: \_\_\_\_\_

Foto do edifício

### 3. Local de implantação

Isolado

Gaveto

Banda/Extremo

Banda/Meio

### 4. Tipologia da estrutura resistente

Pórtico/parede em betão armado

Laminar em betão armado

Viga/pilar em betão armado

Mista (betão/metálica)

Viga/pilar em perfil metálico

Mista (betão/alvenaria)

### 5. Tipologia das paredes exteriores

Paredes de pano duplo

Paredes de pano simples

### 6. Tipologia dos materiais das paredes exteriores

Alvenaria de tijolo furado

Pedra natural

Alvenaria de tijolo maciço

Blocos de betão de argila expandida

Betão

Blocos de betão celular autoclavado

Blocos de betão

Outra: \_\_\_\_\_

### 7. Tipologia dos revestimentos das paredes exteriores

Ladrilhos cerâmicos

Impermeabilização (telas/membranas)

Ladrilhos hidráulicos

Painéis sandwich

Placas de pedra natural

Chapas de zinco

Betão à vista

Chapas de alumínio

Tijolo cerâmico à vista

Chapas de policloreto de vinilo (PVC)

Pintura com acabamento liso/rugoso

Chapas de polimetacrilato de metilo (acrílicas)

ETICS

Outra: \_\_\_\_\_

Técnico: \_\_\_\_\_

Data: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_



## FICHA DE INSPEÇÃO: B

### IDENTIFICAÇÃO DAS PATOLOGIAS E SUAS CAUSAS/ORIGENS

Nº da Ficha: \_\_\_\_\_

#### 1. Localização da anomalia

Fachada

Cobertura

Paredes interiores

Paredes exteriores

Tectos

Escadas

Pavimentos

Outra: \_\_\_\_\_

<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>

Foto da patologia

#### 2. Descrição da anomalia

#### 3. Causa/Origem da anomalia

#### 4. Gravidade da anomalia

Muito ligeira

Ligeira

Média

<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>

Grave

Muito grave

<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>

#### 5. Extensão da anomalia

Pequena

Média

<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>

Grande

<input type="checkbox"/>
--------------------------

#### 6. Ensaios complementares de diagnóstico

Não

Sim, in situ

Indicar quais: \_\_\_\_\_

<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>

Sim, em laboratório

<input type="checkbox"/>
--------------------------

Indicar quais: \_\_\_\_\_

Técnico: \_\_\_\_\_

Data: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_



# FICHA DE REPARAÇÃO

## PROPOSTAS DE REPARAÇÃO

Referente à Ficha de Inspeção N° \_\_\_\_\_

### 1. Localização da anomalia

Fachada

Cobertura

Paredes interiores

Paredes exteriores

Tectos

Escadas

Pavimentos

Outra: \_\_\_\_\_

<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>

Foto da patologia

### 2. Proposta de reparação

---



---



---



---



---



---



---

### 3. Extensão da intervenção no elemento

Localizada

<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>

Extensa

<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>

Média

Total

### 4. Dificuldade de execução da reparação

Fácil

<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>

Difícil

<input type="checkbox"/>
--------------------------

Média

### 5. Tipo da reabilitação

Ligeira

<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>

Média

Profunda

### 6. Observações

---



---

Técnico: \_\_\_\_\_

Data: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

## **Anexo II – Ficha de Avaliação do Estado de Conservação**



## FICHA DE AVALIAÇÃO DO ESTADO DE CONSERVAÇÃO DO EDIFÍCIO

### A. ANOMALIAS DE ELEMENTOS FUNCIONAIS

	Anomalias					Não se aplica	Ponderação	Pontuação
	Muito ligeiras	Ligeiras	Médias	Graves	Muito graves			
	(5)	(4)	(3)	(2)	(1)			
<b>Edifício</b>								
1. Estrutura							x 6 =	_____
2. Cobertura							x 5 =	_____
3. Elementos salientes							x 3 =	_____
<b>Outras partes comuns</b>								
4. Paredes							x 3 =	_____
5. Revestimentos de pavimentos							x 2 =	_____
6. Tectos							x 2 =	_____
7. Escadas							x 3 =	_____
8. Caixilharia e portas							x 2 =	_____
9. Dispositivos de protecção contra queda							x 3 =	_____
10. Instalação de distribuição de água							x 1 =	_____
11. Instalação de drenagem de águas residuais							x 1 =	_____
12. Instalação de gás							x 1 =	_____
13. Instalação eléctrica e de iluminação							x 1 =	_____
14. Instalações de telecomunicações e contra a intrusão							x 1 =	_____
15. Instalação de ascensores							x 3 =	_____
16. Instalação de segurança contra incêndio							x 1 =	_____
17. Instalação de evacuação de lixo							x 1 =	_____
<b>Unidade</b>								
18. Paredes exteriores							x 5 =	_____
19. Paredes interiores							x 3 =	_____
20. Revestimentos de pavimentos exteriores							x 2 =	_____
21. Revestimentos de pavimentos interiores							x 4 =	_____
22. Tectos							x 4 =	_____
23. Escadas							x 4 =	_____
24. Caixilharia e portas exteriores							x 5 =	_____
25. Caixilharia e portas interiores							x 3 =	_____
26. Dispositivos de protecção de vãos							x 2 =	_____
27. Dispositivos de protecção contra queda							x 4 =	_____
28. Equipamento sanitário							x 3 =	_____
29. Equipamento de cozinha							x 3 =	_____
30. Instalação de distribuição de água							x 3 =	_____
31. Instalação de drenagem de águas residuais							x 3 =	_____
32. Instalação de gás							x 3 =	_____
33. Instalação eléctrica							x 3 =	_____
34. Instalações de telecomunicações e contra a intrusão							x 1 =	_____
35. Instalação de ventilação							x 2 =	_____
36. Instalação de climatização							x 2 =	_____
37. Instalação de segurança contra incêndio							x 2 =	_____

### B. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ANOMALIAS

Total das pontuações  
 Total das ponderações atribuídas aos elementos funcionais aplicáveis  
 Índice de anomalias

(a)   
 (b)   
 (a/b)

### C. AVALIAÇÃO

Estado de conservação do edifício: \_\_\_\_\_  
 Estado de conservação dos elementos funcionais 1 a 17: \_\_\_\_\_  
 Existem situações que constituem grave risco para a segurança e saúde públicas e/ou dos residentes: \_\_\_\_\_

### D. OBSERVAÇÕES

## **Anexo III – Fichas Técnicas**

**Ficha de Produto**  
 Edição de Abril de 2011  
 Nº de identificação: 03.114  
 Versão nº 1  
 Sika® MonoTop®-412 S



## Sika® MonoTop®-412 S

Argamassa de reparação estrutural, aplicação manual ou por projecção

### Descrição do produto

Sika® MonoTop®-412 S é uma argamassa de reparação estrutural, monocomponente, reforçada com fibras, com baixa retracção. Cumpre os requisitos da norma NP EN 1504-3 como classe R4.

**Ficha de Produto**  
 Edição de Abril de 2011  
 Nº de identificação: 05.501  
 Versão nº 1  
 Sikaflex® 11 FC+



## Sikaflex® 11 FC+

Mastique de poliuretano multiusos

### Descrição do produto

Sikaflex®-11 FC+ é um mastique monocomponente à base de poliuretano, que cura em contacto com a humidade, para selagens e colagens elásticas. Adequado para aplicações no exterior e interior.

**Ficha de Produto**  
 Edição de Abril de 2011  
 Nº de identificação: 99.001  
 Versão nº 1  
 Sika® Primer-3 N

## Sika® Primer-3 N

Primário para bases porosas e metálicas

### Descrição do produto

Sika® Primer-3 N é um primário monocomponente à base solventes usado para selagem de juntas Sika®, com os produtos da gama SikaBond®, Sikaflex®.

**Ficha de Produto**  
 Edição de Abril de 2011  
 Nº de identificação: 03.201  
 Versão nº 1  
 Sikagard®-700 S



## Sikagard®-700 S

Impregnação repelente de água à base de siloxanos

### Descrição do produto

Sikagard®-700 S é uma impregnação repelente de água monocomponente para superfícies absorventes. Penetra facilmente nos poros abertos da superfície, proporcionando uma repelência de água duradoura, sem alterar a capacidade de difusão de vapor da superfície. Sikagard®-700 S está em conformidade com os requisitos da norma NP EN 1504-2 para impregnações hidrofóbicas (profundidade de penetração Classe I).



### **weber.rep rapide**

Argamassa com fibras para reparação estrutural de betão, Classe R4 (EN 1504-03). Presa rápida. Espessuras elevadas. Sem libertação de pó.

---



### **weber.rep fer**

Revestimento de proteção anticorrosiva. Pronto a aplicar.

---