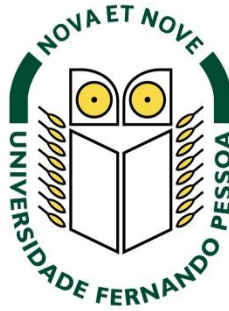


# **Identificação de problemas e soluções em betões e argamassas hidráulicas**

**José Augusto Arteiro Fallé**

Porto, Novembro de 2012

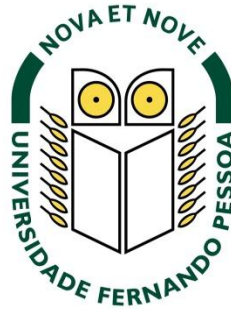




# **Identificação de problemas e soluções em betões e argamassas hidráulicas**

**José Augusto Arteiro Fallé**

Porto, Novembro de 2012



# **Identificação de problemas e soluções em betões e argamassas hidráulicas**

**José Augusto Arteiro Fallé**

Porto, Novembro de 2012

Dissertação apresentada à Universidade Fernando Pessoa como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil

## Sumário

Nesta dissertação pretende-se descrever os processos básicos de degradação, reparação e monitorização de betões e argamassas hidráulicas, nomeadamente das suas camadas de recobrimento. A presença das argamassas hidráulicas é associativa, dadas as razões principais da sua deterioração ser comum à dos betões: a sua constituição física e química análoga. Na verdade, o ataque ao seu ligante cimento, bem como a presença de inertes em pedra natural e o agente hidratante, a água, tornam estes dois materiais construtivos fundamentalmente idênticos.

Sendo certo que não são trazidas novidades nesta área da Construção Civil, acredita-se que este trabalho sistematiza, sucintamente, as diversas avarias mais correntes de betões e argamassas hidráulicas, identificando e catalogando-as de acordo com a normalização em vigor (EN NP 1504) e, sobretudo, realiza o seu enquadramento em termos de soluções interventivas de correção, em quadros de fácil leitura.

Complementarmente, são ainda referidas algumas disposições de monitorização, com o fim do acompanhamento verificativo da solução adotada.

Um caso real de um tipo de problema frequente em zonas marítimas é apresentado, a título de exemplo de aplicação.

## **Abstract**

This dissertation aims to describe the basic processes of degradation, monitoring and repair of concrete and hydraulic mortars, including in coating layers. The presence of hydraulic mortars is associative, since the main reasons of deterioration are similar to those of concrete: the physical and chemical composition is analogous. In fact, the attack on its cement binder, as well as the presence of natural stone aggregates and its hydration agent, water, make these two construction materials fundamentally identical.

Despite not providing novelty in this area of Civil Construction, it is believed that this work succinctly systematizes the various and most common problems in concrete and hydraulic mortars, by identifying and cataloging them according to the current legal standards (NP EN 1504) and, especially, delivers a framework of analysis and intervention, in the form of practical and easy-access tables.

Additionally, some monitoring procedures are also referred, with the purpose of checking and assessing the performance of the adopted solution.

A case study on a common problem in maritime areas is presented in detail, as an example application.

## **Agradecimentos**

Ao meu orientador, Professor João Guerra Martins, agradeço o seu apoio, disponibilidade e valiosos conselhos. Não esquecerei os diálogos científicos que me proporcionou e dos quais tirei proveito.

À Professora Cristiana Ferreira, pela colaboração e constante apoio na edição e composição do texto.

Finalmente, à minha esposa e nossos dois filhos o carinho com que inúmeras vezes compreenderam as minhas ausências.

# Índice

<b>Sumário .....</b>	<b>I</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>II</b>
<b>Agradecimentos .....</b>	<b>III</b>
<b>Índice .....</b>	<b>IV</b>
<b>Índice de Figuras .....</b>	<b>VIII</b>
<b>Índice de Tabelas .....</b>	<b>XII</b>
<b>Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Elementos gerais sobre betão e argamassas hidráulicas .....</b>	<b>4</b>
1.1. Generalidades .....	4
1.2. Composição das argamassas hidráulicas e do betão.....	7
1.2.1. Ligantes .....	8
1.2.2. Agregados/inertes .....	9
1.2.3. Água .....	15
1.2.4. Aditivos e adjuvantes .....	15
<b>2. Identificação dos principais problemas em betão .....</b>	<b>17</b>
2.1. Processos mecânicos e físicos .....	20
2.1.1. Fluência e fadiga .....	20
2.1.2. Cargas de impacto ou vibrações .....	21
2.1.3. Retração.....	21
a) Retração no betão plástico ou fresco.....	22
b) Retração no betão endurecido .....	23

2.1.4.	Temperatura.....	24
2.1.5.	Ciclos de gelo-degelo .....	25
2.1.6.	Desgaste por abrasão, erosão e cavitação.....	26
2.1.7.	Exposição ao fogo .....	27
2.2.	Processos químicos.....	31
2.2.1.	Sulfatos.....	32
2.2.2.	Cloretos .....	35
2.2.3.	Carbonatação .....	38
2.2.4.	Efeito combinado da carbonatação e da ação dos cloretos.....	40
2.2.5.	Reação álcalis-agregado .....	42
	a) Reações álcalis-sílica .....	44
	b) Reações álcalis-silicatos.....	46
	c) Reações álcalis-carbonatos .....	46
2.2.6.	Ataque de água pura .....	47
2.2.7.	Ataque da água do mar .....	48
2.2.8.	Ataque por ácidos.....	49
2.3.	Processos biológicos.....	51
2.4.	Considerações finais .....	53
<b>3.</b>	<b>Sintomas e meios de diagnóstico dos principais problemas em betão.....</b>	<b>54</b>
3.1.	Introdução .....	54
3.2.	Sintomas .....	55
3.3.	Meios de diagnóstico .....	56
3.3.1.	Introdução.....	56
3.3.2.	Localização das barras de aço e espessuras de cobrimento.....	58
3.3.3.	Determinação da resistência a compressão .....	59
3.3.4.	Determinação da densidade e homogeneidade do betão .....	59
3.3.5.	Permeabilidade e porosidade do betão .....	61

3.3.6.	Medida da profundidade de carbonatação .....	61
	a) Método analítico da determinação da profundidade da carbonatação	61
	b) Métodos experimentais de determinação da profundidade de carbonatação .....	62
3.3.7.	Análise de penetração de cloretos, sulfatos e agentes químicos.....	63
	Medição do conteúdo de sulfatos e cloretos.....	64
3.3.8.	Estudo da corrosão das armaduras .....	64
3.3.9.	Resistividade do betão.....	65
3.3.10.	Diagnóstico da reação álcalis-agregado .....	65
<b>4.</b>	<b>Soluções interventivas nos principais problemas em betão e argamassas hidráulicas .....</b>	<b>67</b>
4.1.	Durabilidade, vida útil e necessidade de intervenções .....	67
4.2.	A normalização sobre reparação de betões (EN 1504) e sua aplicabilidade ....	68
4.3.	O caso mais frequente dos problemas e da proteção superficial .....	88
	4.3.1. Métodos de proteção superficial.....	88
	4.3.2. Seleção do método de proteção .....	91
<b>5.</b>	<b>Monitorização e seguimento evolutivo nos principais problemas em betão e argamassas .....</b>	<b>94</b>
5.1.	Razão de ser e finalidade da monitorização .....	97
5.2.	Duração e periodicidade da monitorização.....	97
5.3.	Validade e limites da monitorização pelos sentidos .....	98
5.4.	Monitorização assistida .....	99
<b>6.</b>	<b>Caso prático na resolução de um problema de degradação em pilares de betão armado sujeitos a ambiente marítimo .....</b>	<b>106</b>
6.1.	Descrição do problema em elementos de betão.....	106
6.2.	Causas prováveis e soluções para o problema em estudo.....	108

<b>Conclusões .....</b>	<b>115</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>117</b>

## Índice de Figuras

Figura 1. Causas mais comuns para os problemas em estruturas em betão: EN 1504-9 (IPQ, 2009).....	17
Figura 2. Comportamento das deformações elásticas, plásticas e por fluência (Hasparyk et al., 2005) .....	20
Figura 3. Desgaste em galerias de águas pluviais por: (a) abrasão na laje de fundo e b) erosão, próximo de um degrau (Aguiar, 2000).....	27
Figura 4. Fotografia do teto da sala do antigo gerador em Turow, após o incêndio, na Polónia em 1999.....	29
Figura 5. Ataque químico deteriorou severamente uma viga de betão numa indústria química (Andrade, 2003).....	31
Figura 6. Exemplos de ataque de sulfatos de origem externa (Costa, 2011).....	33
Figura 7. Exemplos de ataque de sulfatos de origem interna numa viga (Costa, 2011).....	33
Figura 8. Desintegração do betão por ataque de sulfatos (Emmons, 1993) .....	34
Figura 9. Esquema da penetração dos cloretos (Costa, 2011).....	36
Figura 10. Esquema dos vários mecanismos de penetração dos cloretos (Costa, 2011).....	37
Figura 11. Pilar sobre o mar após 10 anos de construção, deteriorado devido aos efeitos da interação da carbonatação com iões de cloretos (Aguiar, 2006).....	38
Figura 12. Pilar em indústria com corrosão nas armaduras devido à carbonatação (Aguiar, 2006) .....	40

Figura 13. Dissolução da película passiva por efeito da carbonatação e/ou ação de cloretos (Aguiar, 2006).....	41
Figura 14. Diagrama em árvore do mecanismo de corrosão da armadura (Ferreira, 2000).....	41
Figura 15. Mecanismo do ataque a reações álcalis-agregado (Costa, 2011).....	42
Figura 16. Exemplos da degradação do betão devido a reações álcalis-agregado em: a) fundações; b) barragens (Penetron, 2008); c) pontes (Costa, 2011).....	44
Figura 17. Reação álcalis-sílica: a) Imagem de microscopia eletrónica de partícula agregada de sílex com várias fissuras internas devidas a esta reação, que se estendem ao betão; b) Detalhe do agregado mostrando o gel álcalis-sílica bem como a presença de etringite nas fissuras (Penetron, 2008).....	45
Figura 18. Estruturas de betão localizadas na linha da maré severamente deterioradas (Aguiar, 2006) .....	48
Figura 19. Ataque químico por ácido sulfúrico deteriorou pilar numa indústria de fertilizantes (Aguiar, 2006).....	51
Figura 20. Deterioração por ataque químico em esgotos (Costa, 2011).....	52
Figura 21. Fluxograma do diagnóstico de intervenção (Jâcome e Guerra Martins, 2005).....	54
Figura 22. Ensaio de medição da espessura de recobrimento (Aguiar, 2006).....	59
Figura 23. Determinação da densidade e homogeneidade do betão (Aguiar, 2006) .....	60
Figura 24. Avaliação da homogeneidade de uma viga de betão: a) esquema da viga de ensaios com objetos estranhos ao betão no seu interior; b) resultados da análise dos ensaios ultrassónicos (Lorenzi et al. 2003).....	60

Figura 25. Medição da profundidade de carbonatação através do teste com fenolftaleína: a) betão não carbonatado; b) betão carbonatado (Mendonça, 2005); c) teste indicando uma profundidade de carbonatação de 2cm numa amostra com 4cm de cobrimento de armadura (Aguiar, 2006) .....	62
Figura 26. Medidor de resistividade do betão (Mendonça, 2005).....	65
Figura 27. Vida útil e vida residual (CEB, 1992; Andrade e Alonso, 1996).....	67
Figura 28. A norma EN 1504 e as ligações entre as suas diferentes partes (Sousa, 2011).....	68
Figura 29. Etapas previstas na parte 9 da NP EN 1504 (Silva, 2008; Sousa, 2011) .....	74
Figura 30. Fluxograma da escolha do tratamento superficial (Shields <i>et al.</i> , 1992; Lopes, 2011) .....	89
Figura 31. Esquema de uma impregnação típica (IPQ, 2009).....	91
Figura 32. Esquema de uma impregnação hidrofóbica típica (IPQ, 2009) .....	91
Figura 33. Esquema de um revestimento por pintura (IPQ, 2009).....	91
Figura 34. Vista geral do edifício no <i>Google Earth</i> , onde se evidencia a proximidade da praia. ....	106
Figura 35. Fotografias do exterior e envolvente do edifício.....	107
Figura 36. Identificação do problema: pilares de betão armado com grande fissuração e destacamento do betão.....	108
Figura 37. Sistemas de proteção a) à base de argamassa e b) com revestimento de tinta (Engelfried, 2000).....	109
Figura 38. Etapas do processo de tratamento de cada pilar danificado: a) limpeza; b) aplicação de uma tinta de proteção das armaduras; c) e d) aplicação de uma argamassa	

de enchimento (Weber, 2012); e) aplicação do revestimento exterior (Sika, 2012) .....	111
Figura 39. Processo de tratamento dos pilares: limpeza e proteção das armaduras .....	112
Figura 40. Processo de tratamento dos pilares: recobrimento dos pilares com argamassa selecionada.....	113
Figura 41. Aspeto final dos pilares de betão armado tratados.....	114

## Índice de Tabelas

Tabela 1. Relação entre os tipos de cimento e as suas propriedades (Guerra Martins, 2011).....	9
Tabela 2. Fatores de degradação e efeitos sobre o desempenho (adaptado de Ferreira, 2000).....	19
Tabela 3. Resistência à compressão como percentagem da resistência aos 28 dias (Neville, 1995).....	28
Tabela 4. Variação da velocidade de carbonatação com a humidade relativa do ar (Emmons, 1993).....	40
Tabela 5. Ácidos e outras substâncias que provocam o ataque químico do betão (adaptado de Neville, 1995).....	50
Tabela 6. Princípios, métodos e intervenção referentes a problemas do betão: Princípio 1 [PI] (adaptado de IPQ, 2009; Catarino, 2010, Pereira, 2010, BASF, 2012, Sika, 2012).....	75
Tabela 7. Princípios, métodos e intervenção referentes a problemas do betão: Princípio 2 [MC] (adaptado de IPQ, 2009; Catarino, 2010, Pereira, 2010, BASF, 2012, Sika, 2012).....	76
Tabela 8. Princípios, métodos e intervenção referentes a problemas do betão: Princípio 3 [CR] (adaptado de IPQ, 2009; Catarino, 2010, Pereira, 2010, BASF, 2012, Sika, 2012).....	77
Tabela 9. Princípios, métodos e intervenção referentes a problemas do betão: Princípio	

4 [SS] (adaptado de IPQ, 2009; Catarino, 2010, Pereira, 2010, BASF, 2012, Sika, 2012).....	78
Tabela 10. Princípios, métodos e intervenção referentes a problemas do betão: Princípio 5 [PR] (adaptado de IPQ, 2009; Catarino, 2010, Pereira, 2010, BASF, 2012, Sika, 2012).....	79
Tabela 11. Princípios, métodos e intervenção referentes a problemas do betão: Princípio 6 [RC] (adaptado de IPQ, 2009; Catarino, 2010, Pereira, 2010, BASF, 2012, Sika, 2012).....	80
Tabela 12. Princípios, métodos e intervenção referentes a à corrosão das armaduras: Princípio 7 [RP] (adaptado de IPQ, 2009; Catarino, 2010, Pereira, 2010, BASF, 2012, Sika, 2012).....	81
Tabela 13. Princípios, métodos e intervenção referentes à corrosão das armaduras: Princípio 8 [IR] (adaptado de IPQ, 2009; Catarino, 2010, Pereira, 2010, BASF, 2012, Sika, 2012).....	83
Tabela 14. Princípios, métodos e intervenção referentes à corrosão das armaduras: Princípio 9 [CC] (adaptado de IPQ, 2009; Catarino, 2010, Pereira, 2010, BASF, 2012, Sika, 2012).....	84
Tabela 15. Princípios, métodos e intervenção referentes à corrosão das armaduras: Princípio 10 [CP] (adaptado de IPQ, 2009; Catarino, 2010, Pereira, 2010, BASF, 2012, Sika, 2012).....	84
Tabela 16. Princípios, métodos e intervenção referentes à corrosão das armaduras: Princípio 11 [CA] (adaptado de IPQ, 2009; Catarino, 2010, Pereira, 2010, BASF, 2012, Sika, 2012).....	85
Tabela 17. Propriedades relevantes dos produtos e sistemas de proteção (Catarino, 2010).....	86

Tabela 18. Relações entre princípios e métodos de proteção a adotar (IPQ, 2009) .....	90
Tabela 19. Tipos de monitorização pelos sentidos: aplicação e eficácia.....	99
Tabela 20. Tipos de ensaios, dispositivos e técnicas de monitorização assistida (Montemor, 2007; Arêde e Costa, 2002, entre outros).....	101
Tabela 21. Principais ensaios, dispositivos e técnicas para intervenções estruturais (Oz, 2012).....	105

## Introdução

O betão e as argamassas hidráulicas são materiais de construção de uso corrente, nos quais os agregados são misturados com um ligante e a água, transformando-se numa massa sólida, após o endurecimento da mesma.

Assim, o betão e as argamassas hidráulicas são uns dos mais versáteis e mais usados materiais na construção, de grande durabilidade quando fabricado corretamente e desde que sujeito a condições normais de exposição ambiental. Como exemplo, existem inúmeras construções em betão, executadas no último século, que ainda hoje estão em bom estado de conservação e funcionamento. No entanto, a ideia de um material praticamente eterno e indestrutível, sem necessidade de manutenção, tem sido contestada pela evidência de degradação em diversos edifícios de betão, sendo o facto ainda mais vulgar e evidente no que toca a argamassas hidráulicas.

Reconhece-se atualmente que o betão não é imune ao ambiente onde se encontra, nem às ações mecânicas, físicas, químicas, e até biológicas, a que está sujeito, podendo conduzir a uma redução mais ou menos significativa do seu desempenho e a uma diminuição da vida útil.

Esta dissertação aborda o tema dos problemas ou patologias em betão e argamassas hidráulicas, com vista à sua identificação e resolução, passando pelas fases de (i) diagnóstico, (ii) solução e (iii) monitorização.

As causas para a prematura degradação do betão e das argamassas hidráulicas são de natureza variada, distinguindo-se habitualmente as causas de origem humana e de origem natural.

Em termos das causas humanas, constata-se que nem sempre são aplicadas as melhores e mais adequadas práticas construtivas, não só ao nível do projeto, mas também ao nível da

execução, com consequências no desempenho do betão. A inadequabilidade à agressividade do meio ambiente, erros de pormenorização do projeto ou a sua deficiente interpretação e má execução da obra são exemplos dessas causas.

A degradação do betão e das argamassas hidráulicas por causas naturais pode dever-se a processos mecânicos, químicos, físicos ou mesmo biológicos. Nas ações naturais incluem-se: (i) as ações mecânicas - como as sobrecargas, vibrações, ações de impacto ou a abrasão; (ii) as físicas - como o gelo/degelo, grandes variações de temperatura, erosão ou o desgaste; (iii) as ações químicas - como a carbonatação devido ao CO<sub>2</sub>, ataque de sulfatos e cloretos ou a reação álcalis-agregado, e finalmente, (iv) as ações biológicas - de origem vegetal (raízes e fungos) e de origem animal (dejetos de aves e ação dos esgotos com a presença do enxofre).

Assim, esta dissertação tem como objetivo principal o estudo da identificação de problemas do betão e das argamassas hidráulicas, através do diagnóstico dos sintomas e na definição das respetivas soluções de reparação e reabilitação.

Para a elaboração deste trabalho, foi realizada uma extensa pesquisa bibliográfica, em livros, artigos científicos e em textos didáticos, bem como em *locais* da Internet, muitos dos quais se encontram referidos ao longo do texto e devidamente identificados no fim da dissertação.

Como forma de melhor organizar toda a informação compilada no decurso deste trabalho, procurou-se fazer uma sistematização resumida através de tabelas de consulta rápida e direta.

Em termos da sua organização, esta dissertação está dividida em seis capítulos, com o seguinte conteúdo:

- Capítulo 1 - apresentação sucinta e introdutória relativamente aos materiais de construção em estudo, designadamente o betão e as argamassas hidráulicas;
- Capítulo 2 - identificação dos principais problemas do betão e das argamassas hidráulicas;

- Capítulo 3 - abordagem dos sintomas e meios de diagnóstico dos principais problemas no betão e nas argamassas hidráulicas. Trata-se de um processo de levantamento de problemas e anomalias em estruturas de betão e consiste no registo das origens, sintomas e natureza dos problemas por eles apresentados, no seu estado atual. A resolução dos problemas em betão inicia-se com a fase de diagnóstico, que engloba as seguintes fases: (i) identificação dos sintomas, (ii) recolha de informação e exame detalhado da situação, (iii) restabelecimento do diagnóstico das causas, (iv) definição da solução e atuação corretiva.
- Capítulo 4 - soluções interventivas nos principais problemas do betão e das argamassas hidráulicas onde se abordam: (i) a durabilidade, vida útil e necessidade de intervenções, (ii) a normalização sobre reparação de betões (EN 1504) e sua aplicabilidade, (iii) o caso mais frequente dos problemas e da proteção superficial, (iv) os métodos de proteção superficial e (v) a seleção do método de proteção.
- Capítulo 5 - a monitorização e seguimento evolutivo nos principais problemas no betão e argamassas, razão de ser e finalidade da monitorização, duração e periodicidade da monitorização, validade e limites da monitorização pelos sentidos e monitorização assistida.
- Capítulo 6 - caso prático no qual se procurou solucionar um problema de degradação em pilares de betão armado sujeitos a ambiente marítimo. O processo de observação dos sintomas, o diagnóstico e análise da patologia e a metodologia de solução do problema são detalhadamente descritos e ilustrados, exemplificando a aplicabilidade dos conceitos expostos nos capítulos anteriores.

# 1. Elementos gerais sobre betão e argamassas hidráulicas

## 1.1. Generalidades

Uma argamassa hidráulica pode ser definida, de forma muito simples, como um betão sem inertes grossos, o que lhe confere diferenças notáveis, tanto no comportamento como na sua utilização, independentemente dos muitos e consideráveis pontos comuns com o betão.

Relativamente ao betão, pela sua relevância estrutural, trata-se de um material de construção de custo relativamente reduzido, quando comparado com outros materiais concorrentes (como o aço estrutural, usado em perfis metálicos), cujo fabrico e uso tem vindo a aplicar-se em todos os tipos de obras a nível planetário. Mesmo em estruturas onde os outros materiais de construção são usados como materiais estruturais, tais como o aço ou a madeira, o betão surge como praticamente imprescindível, por exemplo, nas fundações e em muros de contenção de solos.

As propriedades do betão endurecido são muito importantes e dependem de muitos fatores. No entanto, ao contrário da maioria dos materiais estruturais, que são fornecidos já prontos a serem utilizados nas construções, a produção, transporte, colocação e compactação do betão são da responsabilidade dos técnicos locais de Engenharia Civil.

Segundo Reis (2001) e Guerra Martins (2011), a obtenção de um betão com qualidade requer uma série de cuidados diferenciados, entre os quais:

1. A escolha de seus materiais constituintes (principalmente a qualidade e a natureza dos mesmos);
2. A determinação de um traço (relação cimento/água/agregados) que garanta a resistência, a economia, impermeabilidade/porosidade e a durabilidade desejada;
3. A homogeneização da mistura (toda a massa deve ficar com a mesma distribuição constitutiva/propriedades);
4. A sua correta aplicação (para o melhor fabrico da peça estrutural);

5. A máxima compactação (expulsão de ar do seio do betão);
6. Uma “cura” adequada (processo de salvaguarda das condições de endurecimento e ganho de resistência do betão) que garantirá a completa e eficaz hidratação do cimento.

Também é de referir que as propriedades do betão endurecido não são estáticas e vão evoluindo ao longo do tempo. Por exemplo, cerca de 50 a 60% da resistência final desenvolve-se nos primeiros 7 dias, 70 a 85% em 28 dias, sendo que mesmo ao fim de 30 anos de idade do betão se têm verificado aumentos mensuráveis de resistência.

Basicamente, os constituintes do betão são:

- Ligantes (cimento ou cimento e adições);
- Água;
- Agregados (também designados por inertes, com base em rochas naturais);
- Aditivos e/ou adjuvantes (eventualmente, enquanto substâncias que alteram as propriedades básicas do betão comum).

Os agregados ocupam em geral 70-80% do volume do betão, isto é, cerca de  $\frac{3}{4}$  do volume total.

A presa e o endurecimento do betão, que ocorrem devido a uma série de reações químicas entre o ligante e a água, a que se dá o nome de hidratação, dependem de múltiplos fatores que podem condicionar a sua qualidade, seriamente. O principal objetivo da dosagem consiste em encontrar a mistura mais económica para a obtenção ótima de um betão, com características capazes de atender às condições de serviço exigidas, utilizando os materiais disponíveis (designadamente a gama de dimensões dos seus agregados/inertes: areias e britas).

É óbvio que as vantagens decorrentes do tempo despendido na procura de uma mistura de cimento e agregados mais económicos, só se evidenciam quando se trata de volumes razoáveis de betão.

Há, portanto, tipos de trabalhos nos quais se justificam traços já conhecidos e aplicados em obras semelhantes. Nesses casos, o esforço envolvido no processo de encontrar a dosagem otimizada é perfeitamente dispensável.

As exigências relativas ao betão endurecido são especificadas pelo projetista da estrutura, como: (i) a classe de resistência; (ii) a maior dimensão do inerte; (iii) a consistência; (iv) o máximo teor de cloretos; etc.

Outras especificidades podem ser enunciadas, como: (i) a compactidade; (ii) a impermeabilidade; (iii) a porosidade, etc. Porém, atendendo a alguma dificuldade na quantificação e verificação destes últimos índices, a normalização (como a norma NP EN 206) não costuma recorrer a estes últimos indicadores.

Também preocupações concernentes às propriedades do betão fresco são importantes, dependendo: (i) do tipo da construção; (ii) das técnicas de transporte; (iii) lançamento e (iv) compactação. Estes dois conjuntos de exigências (do betão fresco e endurecido) habilitam o engenheiro a determinar a composição da mistura, tendo em mente o grau de controlo que será exercido na obra.

O aspeto económico do problema deve, no entanto, ser considerado (lembremo-nos das grandes quantidades deste material de construção consumidas em obra). O custo da betonagem de qualquer tipo de obra depende, primordialmente: (i) do custo dos materiais componentes; (ii) da mão-de-obra; (iii) da quantidade de betão e tempo despendido na betonagem e (iii) do equipamento.

A variação do custo dos materiais decorre, principalmente, do facto de que o cimento é muitas vezes mais caro do que o agregado, daí o interesse pela utilização de misturas com o mínimo possível desse material, mas mantendo-se as qualidades impostas.

A procura do melhor traço pode-se obter (caso o betão não chegue pronto à obra, existindo nesta central própria):

1. De uma primeira análise das dimensões dos inertes realmente disponíveis, rececionados em obra (tamanhos reais de areias e britas existentes para fabrico,

procurando uma relação inicial provisória entre constituintes), podendo dar-se início ao fabrico em obra – no sentido de a mesma não se encontrar parada;

2. Aperfeiçoamento do traço no laboratório (que existindo, convenientemente, na própria obra pode ser quase instantâneo);
3. Posterior correção em obra, até como função dos ensaios sobre betão endurecido.

Esta última providência, recomendada por muitos especialistas, decorre do facto de ser impossível reproduzir no laboratório todas as condições de produção do betão.

A resistência mecânica do betão é tida, comumente, como a sua propriedade mais importante, apesar de, em alguns casos, outras características, como a durabilidade e a impermeabilidade, serem consideradas como tais.

## **1.2. Composição das argamassas hidráulicas e do betão**

O betão é, conforme já foi referido, uma mistura em proporções adequadas de cimento, areia, brita e água. Ou seja, o betão é uma argamassa em que aparece mais um material inerte de dimensões bastante superiores às da areia (o que permite economia – dado que as britas são mais baratas que as areias, em geral – e maior resistência – uma vez que as britas são as principais responsáveis pela maior robustez do betão). Esta mistura tem a propriedade de fazer presa e endurecer com o decorrer do tempo, tal como a argamassa.

Dada a pequena diferença concetual entre ambos, parece-nos razoável forcarmo-nos no betão e apenas ressaltar as suas disparidades com as argamassas hidráulicas (com base no ligante cimento, sendo excluídos outros ligantes, como a cal hidráulica ou a cal aérea).

Genericamente, o betão deve ter todas as qualidades indicadas para as argamassas. Contudo, são de salientar duas características que normalmente sempre devem estar presentes: (i) a resistência mecânica e (ii) a compacidade. A estas deve-se acrescentar, ainda, (iii) a facilidade de moldagem, como propriedade muito significativa, dado ser uma das razões que faz deste material o mais utilizado no fabrico de estruturas (uma vez que permite tomar qualquer tipo de forma e ser fabricado em obra).

Por outro lado, o betão deve evitar a sua própria segregação, que é um fenómeno que consiste na separação e deposição dos inertes grossos da restante massa, devido às vibrações durante o transporte, descarga e colocação em obra (neste último caso, muito provavelmente, por excesso de vibração do betão).

Não se deverá confundir segregação com a separação dos finos (e da pasta cimentícia) dos grossos, por os últimos ficarem presos entre as armaduras, dado a sua dimensão ser superior ao mínimo afastamento entre varões.

### **1.2.1. Ligantes**

Os ligantes a utilizar devem ser escolhidos em função de diversos parâmetros, dentro dos quais sobressai o tipo e classe do betão a fabricar.

Vale a pena lembrar que a velocidade de endurecimento do cimento depende, entre outros, dos seguintes fatores:

- Temperatura e tempo de calcinação da matéria original do cimento;
- Finura do cimento;
- Relação cimento/água da amassadura;
- Condições climatéricas,
- Presença de aditivos.

Como é notório, na esmagadora maioria das situações, o ligante a utilizar é o cimento Portland normal (pela sua excelente relação preço/desempenho, em situações correntes).

Obviamente que situações especiais requerem exceções, como no caso de betonagens de grandes massas (com dimensões superiores a 1.5 m), em que se usam ligantes que produzem baixo calor de hidratação, tais como cimento de alto-forno (60/80) e o cimento pozolânico.

Nas Tabelas 1 e 2 é resumidamente apresentada a relação entre os tipos de cimento e as suas propriedades, nomeadamente no que concerne ao fabrico de betão.

<b>Tabela 1. Relação entre os tipos de cimento e as suas propriedades (Guerra Martins, 2011)</b>					
Propriedades	Tipo de cimento				
	Comum e composto	Alto-forno	Pozolânico	Alta resistência inicial	Resistente a sulfatos
Resistência à compressão	Padrão	Menor no início, mas maior no final da cura	Maior nos primeiros dias	Muito maior nos primeiros dias	Padrão
Calor/reação = Cimento/água	Padrão	Menor	Menor	Maior	Padrão
Impermeabilidade	Padrão	Maior	Maior	Padrão	Padrão
Resistência a agentes agressivos	Padrão	Maior	Maior	Maior	Maior
Durabilidade	Padrão	Maior	Maior	Padrão	Maior

<b>Tabela 1 (cont.). Relação entre os tipos de cimento e as suas propriedades (Guerra Martins, 2011)</b>		
Propriedades	Tipo de cimento	
	Branco estrutural	Baixo calor de hidratação
Resistência à compressão	Padrão	Menor nos primeiros dias, mas padrão no final da cura
Calor/reação = Cimento/água	Maior	Menor
Impermeabilidade	Padrão	Padrão
Resistência a agentes agressivos	Menor	Maior
Durabilidade	Padrão	Maior

### 1.2.2. Agregados/inertes

O uso como material de construção de apenas pasta de cimento (cimento e água) endurecida seria possível, considerando-se apenas a sua resistência direta, mas com as

seguintes três desvantagens essenciais:

1) **Instabilidade dimensional**, dadas as elevadas fluência (deformação no tempo) e retração a curto e longo prazo (perda de volume, seja por abaixamento de temperatura após o fim dos fenómenos exotérmicos de hidratação, como pela perda de água – quer pela razão anterior, como por alguma perda por evaporação, bem ainda como resultado de reações químicas instantâneas e no tempo);

2) **Custo elevado** (o cimento é um material caro, atendendo à proporção do volume de betão na generalidade das construções), pois a sua produção envolve equipamentos industriais de grandes dimensões, jazidas de matéria-prima adequadas e altos consumos de energia;

3) **Resistência condicionada**, à própria resistência do cimento, dado que a presença de inertes qualificados (que podem ter resistência 4 a 5 vezes superiores à da própria mistura cimentícia de base, de apenas água e cimento) poder aumentar a resistência do betão.

Ora, estas desvantagens podem ser ultrapassadas, ou, pelo menos, consideravelmente minimizadas (quer em termos de vantagens físicas-químicas quer de custos) acrescentando agregados à pasta de cimento, isto é, usando betão (cimento, pedra natural e água).

O objetivo deve ser o uso da (i) maior quantidade possível de agregados/inertes, bem como nas (ii) maiores dimensões praticáveis (menor custo de britagem e resistência mecânica superior) ou seja, deve ser utilizado o máximo de agregado e com a maior dimensão possível, compatível com as condições estruturais e da obra. Contudo, o objetivo também passa pela ambição de que estas diferentes partículas (nas suas diversas dimensões) sejam aglomeradas de forma proporcionada pela quantidade mínima de pasta de cimento, reduzindo ao extremo de vazios e quantidade de cimento.

Assim, e de facto, deve considerar-se a necessidade de uma granulometria heterogénea, ou seja, não basta usar o agregado grosso, mais económico e eventualmente mais resistente, é preciso utilizar também areia de diferentes dimensões, de modo a reduzir o volume de vazios entre as partículas de agregado grosso (britas).

Na verdade, os agregados, também designados por inertes, têm que abranger uma gama variada de dimensões para que, encaixando-se uns nos outros, possam preencher os vazios que uma só granulometria provocaria, independentemente do valor dessa dimensão única. É curioso notar que a baridade, ou densidade aparente de uma granulometria baixa, não difere, tanto quanto se poderia supor, de outra mais elevada.

Assim, desde a areia fina ao agregado mais grosso (brita de maiores dimensões), deve-se seleccionar a melhor, ou mesmo a ótima, proporção entre os agregados disponíveis para o fabrico de determinado betão, não só de modo a minimizar o conteúdo em vazios na mistura de agregados, como também para minorar a quantidade de pasta de cimento necessária para preencher os vazios finais (do conjunto de agregados grossos e finos).

Diga-se que o cumprimento do parágrafo anterior melhora, significativamente, a perspetiva de durabilidade de um betão, reduzindo a incidência de muitas das avarias que à frente vão ser descritas.

Neste balanço, uma mistura de agregados com a máxima compacidade possível conduz, em geral, a um volume de 70 a 80% no total do betão (conforme anteriormente adiantado).

Os agregados são constituídos, sobretudo, por:

- Fragmentos de rochas naturais (por alteração e depósito das originais – como areias de rios – ou britadas – obtidas por desmonte mecânico de jazidas de rocha);
- Partículas artificiais especificamente fabricadas para o emprego em betão;
- Partículas obtidas a partir da reciclagem de determinados materiais.

A sua dimensão que varia, geralmente, entre cerca de 0,1 mm e 300 mm e estão dispersas pela pasta de cimento. É de salientar que o valor de 300 mm refere-se já a tipos de betões especiais, como o ciclópico, pois para betões correntes o valor comum máximo ronda os 20 a 30 mm (raramente atinge ou ultrapassa 35 mm).

É necessário tomar em conta que as características do agregado afetam, profundamente, o comportamento do betão.

Como se disse, também se usa o termo “inerte”, mas as partículas de rochas que o constituem não são realmente inativas, na medida em que as suas propriedades físicas, térmicas e, por vezes, químicas afetam o desempenho do betão com estas produzido (Neville, 1995). Isto é, as partículas de agregado podem, em certas condições, reagir com a matriz cimentícia do betão (Bertolini e Pedefferi, 1995).

Na primeira versão portuguesa da Norma Europeia NP ENV 206 (Março de 1993), “Betão - Comportamento, produção, colocação e critérios de conformidade”, ainda é utilizado o termo inerte em vez de agregado, sendo definido como: “Material constituído por substâncias naturais ou artificiais, britadas ou não, com partículas de tamanho e forma adequados para o fabrico de betão”.

As propriedades mais importantes exigidas a um agregado para produzir o betão são de natureza geométrica, física e química, nomeadamente:

- Adequada forma e dimensões proporcionadas (granulometria), segundo determinadas regras, como baixo índice de vazios, baixa porosidade, elevada impermeabilidade, entre outros;
- Adequada resistência mecânica, da qual depende a resistência final do próprio betão, em grande medida (a resistência mecânica do betão é, sobretudo, dada pela resistência dos agregados e, só depois, pela classe de resistência do cimento e sua quantidade);
- Adequadas propriedades térmicas, com vista a suportar o calor de hidratação e a evitar variações dimensionais significativas em serviço, função das alternâncias ambientais;
- Adequadas propriedades químicas relativamente ao ligante e às ações exteriores – não reativos;
- Isenção de substâncias prejudiciais, desde impurezas a incrustações, como cloretos, carbonatos e/ou sulfatos.

A melhor informação que se pode obter sobre a qualidade de um agregado é a observação do comportamento do betão produzido com esse agregado. De facto, em última análise (ou caso de dúvida), os agregados devem ser julgados a partir das propriedades do betão que

com eles se confeciona e não, exclusivamente, a partir de resultados de diversos ensaios que dão indicações sobre a qualidade do agregado, permitindo apenas prever o seu comportamento no betão. Obviamente que tal se torna inexecutável, em geral, pelo que se tem que confiar nos ensaios imediatos disponíveis sobre agregados.

Genericamente, se um dado agregado submetido aos diversos ensaios apresenta todas as propriedades adequadas, então é sempre possível produzir um betão de qualidade com esse agregado.

É de referir que se tem verificado que um agregado aparentemente inadequado, relativamente a uma ou outra propriedade, poderá conduzir a um betão de boa qualidade. Por exemplo, o agregado proveniente de uma rocha que resiste mal a ciclos de gelo e degelo (rocha geladiça) poderá ter um comportamento satisfatório no betão, sobretudo se as partículas desse agregado estiverem bem envolvidas por pasta de cimento hidratada de baixa permeabilidade. Dada a menor absorção de água que esta pasta permite, a sensibilidade e efeitos aos ciclos de gelo e degelo decaem, pelo que o pior desempenho do seu agregado, neste aspeto, fica ultrapassado.

Os agregados podem ser de **origem natural direta**, como os agregados naturais (por exemplo, as areias e os godos, muito usados nos primeiros betões) ou os agregados **obtidos por britagem** de materiais naturais (por exemplo, as britas e as areias britadas, a realidade dos betões atuais). Existem, também, agregados artificiais que são obtidos industrialmente com vista à produção do betão com determinadas propriedades, por exemplo a argila ou xisto expandidos (betão leve).

Entre as vantagens e desvantagens dos agregados rolados face aos britados (fragmentados em pedreira), cite-se:

- Maior resistência mecânica dado serem o melhor que restou da rocha original fragmentada, só ficando as melhores partículas da mesma (nos agregados britados ainda estão presentes todos os componentes mineralógicos da rocha original, tanto os mais como os menos resistentes);
- Trabalhabilidade superior, uma vez que a sua geometria facilita o movimento dos

agregados no seio do betão;

- Não possuem arestas vivas e saliências que podem fraturar a mistura cimentícia em peças comprimidas;
- Contudo, são agregados mais lisos e, logo, menos aderentes à pasta cimentícia.

Outros constituintes são empregues no fabrico de betões são subprodutos industriais, tais como: (i) as cinzas volantes, obtidas por combustão do carvão nas centrais térmicas; (ii) as escórias de alto-forno, subproduto do fabrico do aço; (iii) subprodutos da indústria corticeira e ainda (iv) outros produtos como poliestireno expandido (usado em betão leve de enchimento, como para cobertura de infraestruturas em pavimentos, ou camadas de forma para inclinação de coberturas horizontais). Todavia, os casos (i) e (ii) não podem ser considerados inertes, em geral, sendo mais à frente neste texto introduzidos com outras designações e finalidades.

Mais recentemente tem-se utilizado agregados obtidos por **reciclagem de materiais** de construção, como produtos obtidos por trituração de betão endurecido (escombros de betão armado ou simples).

Porém, os resultados obtidos por esta via não permitem o seu uso em betões estruturais, dada a dispersão dos valores de resistência, sendo mais usados em betão em massa, sem grandes preocupações de resistência mecânica.

É claro que neste caso podem surgir alguns problemas para designar esta mistura por betão, dado a classificação de argamassa também ser justificada.

Os constituintes minerais das rochas naturais podem dar algumas indicações sobre as propriedades do agregado, sendo decididamente indesejáveis os seguintes: (i) sulfuretos, gesso, anidrites; (ii) óxidos de ferro; (iii) minerais argilosos. Entre os que não causam problemas incluem-se (i) a calcite e (ii) os minerais siliciosos (excluindo os feldspatos alterados ou em vias de alteração).

### 1.2.3. Água

A água da amassadura não deve conter impurezas (materiais em suspensão, sais dissolvidos e matéria orgânica) em quantidades prejudiciais. A água potável pode ser usada, sem reservas, no fabrico de betão.

A NP EN 206, e norma ISO aplicável, indicam os limites máximos de impurezas a observar na água de amassadura (referente a valores de elementos químicos como (i) cloretos, (ii) sulfatos, (iii) álcalis e outras substâncias contidas na água e em todos os componentes).

A água, sendo indispensável, no fabrico de betões e argamassas hidráulicas, é o elemento mais crítico destes materiais, dadas as pequenas variações na sua quantidade relativa (sobretudo para mais que o estritamente necessário) comprometerem gravemente as suas propriedades, sobretudo a resistência mecânica.

### 1.2.4. Aditivos e adjuvantes

O objetivo dos aditivos/adjuvantes consiste em introduzir modificações nas características do betão de modo a melhorá-las. Segundo Guerra Martins (2011), é de salientar, como exemplo: (i) o aumento da trabalhabilidade ou da variação de níveis de consistência; (ii) a redução da água de amassadura, ou seja, a redução da relação água/cimento, com resistência igual ou superior à do betão com menos ligante; (iii) a diminuição ou aumento do tempo de presa; (iv) o retardamento ou redução da libertação de calor durante a presa inicial; (v) o incremento do acabamento final; (vi) a impermeabilidade/porosidade (vii) e o controlo da segregação. Assim, estas alterações introduzidas pelos aditivos/adjuvantes às características base do betão (ou das argamassas hidráulicas) permitem obter vantagens, tais como:

- Adquirir resistências significativas a curto prazo, permitindo uma entrada em serviço das estruturas mais cedo, bem como facultando a sua descofragem e descimbramento mais rapidamente (permitindo uma mais célere rotação dos acessórios de fabrico);
- Retardar a presa, com vista a alargar o tempo de transporte do betão pronto (fabricado em central externa à obra);

- Reduzir o custo das operações de betonagem;
- Facilitar a sua colocação;
- Melhorar o acabamento superficial;
- Aumentar a qualidade do betão, sobretudo a resistência inicial e final, e ainda o módulo de elasticidade;
- Diminuir a permeabilidade e a absorção;
- Incrementar a resistência à corrosão;
- Melhorar a ligação com o pré-esforço;
- Controlar a expansão causada pela reação alcalina com certos agregados.

A utilização de aditivos ou adjuvantes é tão antiga como a do próprio cimento natural. Os romanos utilizaram o sangue, a clara de ovo, a banha e o leite como adjuvantes no betão de pozolana, provavelmente com o fim de melhorar a trabalhabilidade (Guerra Martins, 2011).

A comercialização dos produtos destinados a melhorar certas características do betão terá começado por volta de 1910. Naquela época, os adjuvantes eram hidrófugos (impermeabilizantes de argamassa e betão), aceleradores de presa, ou hidrófugos e aceleradores de presa simultaneamente. A partir dessa época, começaram a ser empregues os adjuvantes, dando origem à intensa comercialização que vem até à atualidade.

Assim, o betão deixou de ser uma mistura racionalizada de cimento, areia e brita, mas evoluiu para um material estudado, contendo adicionalmente uma mistura de aditivos ou adjuvantes. Contudo, não se deve supor que a incorporação do adjuvante possa corrigir o betão mal fabricado.

Como definição académica, e muito genérica, pode dizer-se que “aditivo é todo o produto não indispensável à composição e finalidade do betão, que combinado com este, imediatamente antes ou durante a mistura do betão, em quantidades geralmente pequenas e bem homogeneizadas, faz aparecer ou reforça certas características” (Guerra Martins, 2011).

## 2. Identificação dos principais problemas em betão

Genericamente, os processos principais que causam a deterioração do betão podem ser agrupados, de acordo com a sua natureza, em: i) mecânicos; ii) físicos; iii) químicos e iv) biológicos. Contudo, outras classificações são correntes, como se mostra na Figura 1.

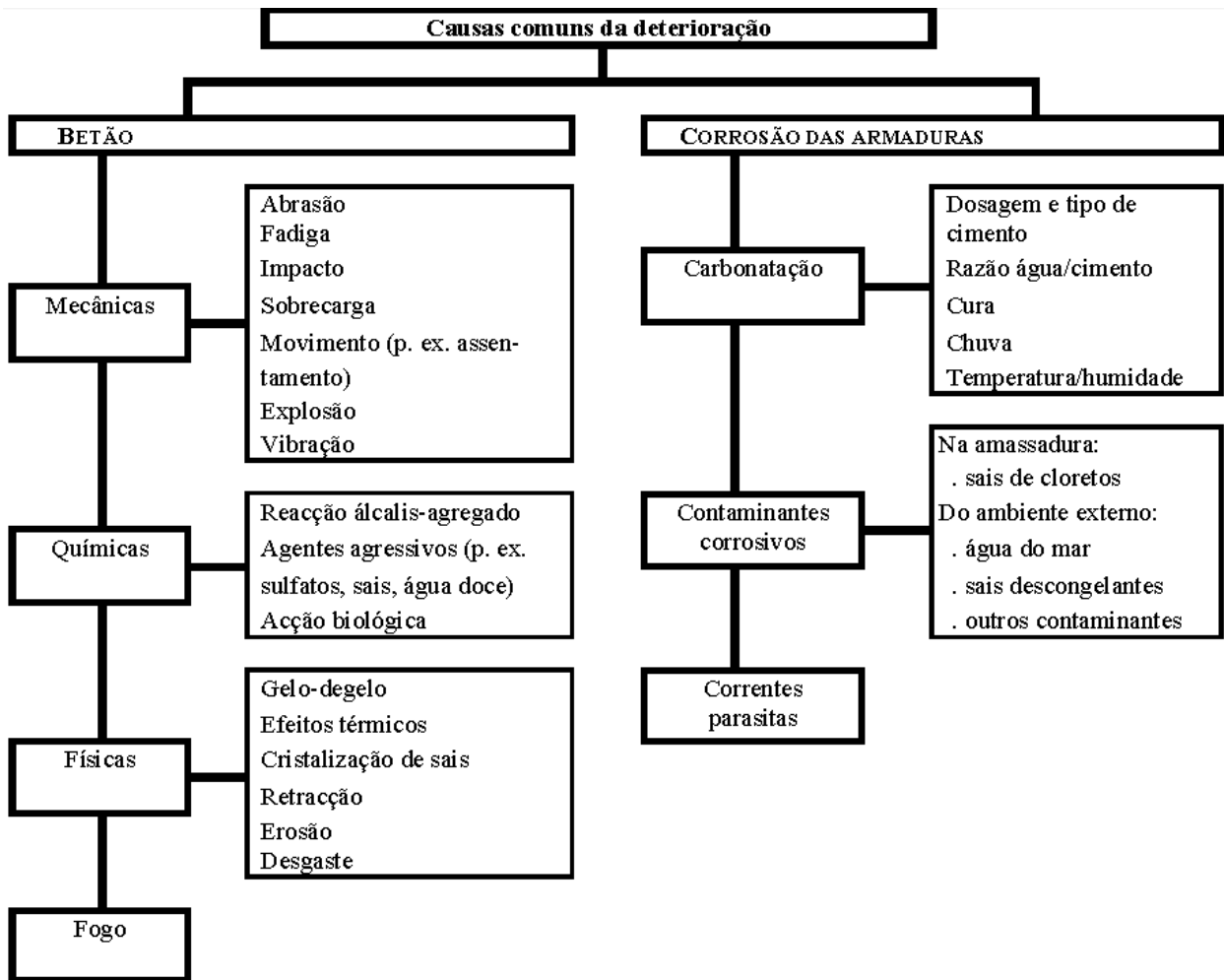


Figura 1. Causas mais comuns para os problemas em estruturas em betão: EN 1504-9 (IPQ, 2009)

Na realidade, a deterioração do betão ocorre muitas vezes como resultado de uma combinação de diferentes fatores externos e internos. São processos complexos, determinados pelas propriedades físico-químicas do betão e da forma como está exposto. Os processos de degradação alteram a capacidade de o material desempenhar as suas

funções e nem sempre se manifestam visualmente.

Os três principais sintomas que podem surgir isoladamente ou simultaneamente são i) a fissuração; ii) o destacamento e iii) a desagregação.

Na Tabela 2 são apresentados os principais fatores de degradação do betão, bem como os processos que lhes dão origem e os efeitos ou danos sobre o seu desempenho final. Para posterior referência, inclui-se ainda a sigla atribuída a cada fator de degradação.

Conforme mostra a tabela, distinguem-se habitualmente os seguintes problemas, que serão detalhadamente descritos de seguida:

- Processos mecânicos e físicos
  - a) Fluência e fadiga
  - b) Cargas de impacto
  - c) Retração (no betão plástico e no betão endurecido)
  - d) Temperatura
  - e) Ciclos de gelo-degelo
  - f) Desgaste por abrasão, erosão e cavitação
  - g) Exposição ao fogo
- Processos químicos
  - a) Reação álcalis-agregado (álcalis-sílica, álcalis-silicatos e álcalis-carbonatos)
  - b) Sulfatos
  - c) Cloretos
  - d) Carbonatação
  - e) Ataque de água pura
  - f) Ataque da água do mar
  - g) Ataque por ácidos
- Processos biológicos

<b>Tabela 2. Fatores de degradação e efeitos sobre o desempenho (adaptado de Ferreira, 2000)</b>			
Processo de degradação	Fator de degradação	Degradação / Dano	Sigla
<b>Mecânicos</b>			
Fluência	Carregamento estático	Deflexão, fissuração, rotura	M1
Fluência e fadiga	Carregamento cíclico	Deflexão, fissuração, rotura	M2
Fadiga	Carregamento por impacto	Vibração, deflexão, fissuração, rotura	M3
<b>Físicos</b>			
Retração no betão plástico	Varição da humidade	Deformação restringida	F1
Retração no betão endurecido	Varição da humidade		F2
Temperatura	Varição da temperatura	Deformação restringida por expansão ou contração	F3
Ciclos de gelo-degelo	Gelo	Desagregação do betão	F4
Desgaste por abrasão	Gelo, tráfego	Destacamento, fissuração e rotura	F5
Desgaste por erosão	Água corrente	Danos superficiais	F6
Desgaste por cavitação	Água turbulenta	Cavidades	F7
Exposição ao fogo	Fogo	Perda de resistência	F8
<b>Químicos</b>			
Reações álcalis-sílica e álcalis-silicatos	Agregados (sílica, silicatos) + álcalis	Expansão, desagregação	Q1
Reação álcalis-carbonato	Agregados (carbonato) + álcalis		Q2
Sulfatos	Constituintes do betão, contacto com sulfatos	Expansão e desagregação do betão	Q3
Cloretos	Ação de cloretos	Fissuração do betão	Q4
Carbonatação	Ação do CO <sub>2</sub>	Redução do pH do betão	Q5
Ataque de água pura	Água pura	Lixiviação e desagregação do betão	Q6
Ataque da água do mar	Água do mar		Q7
Ataque por ácidos	Ácido		Q8
<b>Biológicos</b>			
Produção de ácido	Microrganismos e bactérias	Lixiviação	B1

## 2.1. Processos mecânicos e físicos

### 2.1.1. Fluência e fadiga

O betão sob carga pode estar sujeito a três tipos de deformação: (i) elástica, (ii) plástica e (iii) viscosa, como também as combinações entre elas.

A deformação elástica, ou imediata, é reversível e pode ser totalmente recuperada quando do descarregamento do betão. Já a deformação lenta, ou por fluência, refere-se a uma deformação parcialmente reversível, plástica. A Figura 2 mostra, de forma esquemática, o comportamento da deformação imediata e por fluência, quando do carregamento e descarregamento do betão, mostrando a sua reversibilidade.

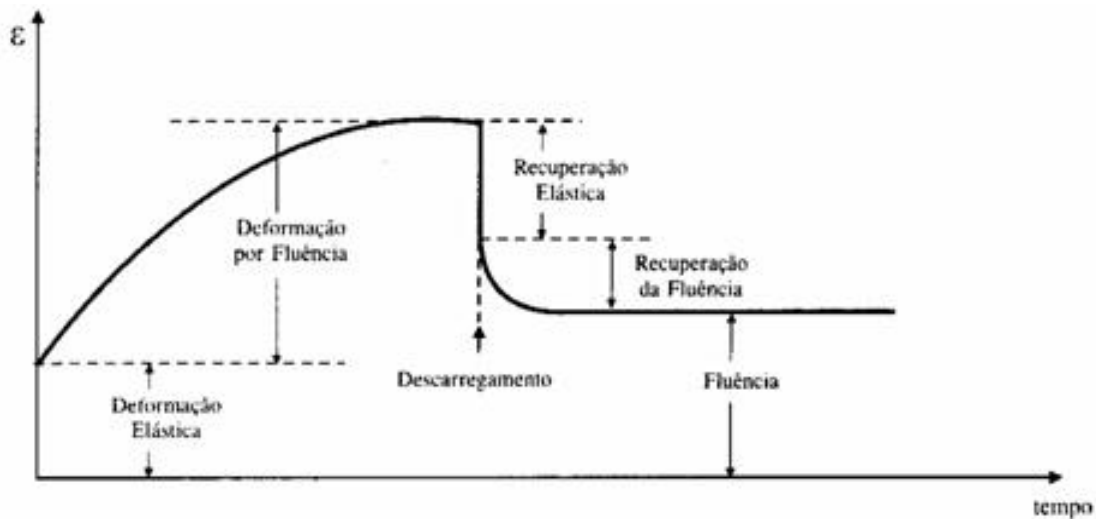


Figura 2. Comportamento das deformações elásticas, plásticas e por fluência (Hasparyk et al., 2005)

A deformação viscosa não é recuperável quando ocorre o descarregamento do betão. A fluência ou deformação lenta pode ser definida como a deformação que o betão sofre devido a um carregamento contínuo, podendo ocorrer sob compressão, tração ou corte. Como ela é parcialmente reversível, trata-se de uma propriedade viscoelástica (Hasparyk et al., 2005).

Podem existir dois tipos de fluência: (i) a básica e (ii) por secagem, quando ocorre troca de humidade para o ambiente externo, sendo a fluência total a soma das duas. Portanto, a

humidade relativa do meio envolvente é um dos fatores externos mais importantes neste processo, sendo a fluência tanto maior, quanto menor for a humidade relativa (Hasparyk et al., 2005).

Quanto à fadiga, esta provoca o aumento da deformação por aplicação repetida de uma carga ao longo de um tempo. Tensões cíclicas e carregamentos repetitivos inferiores à tensão máxima resistente podem provocar rutura por fadiga em estruturas de pontes, ou naquelas sujeitas às ações do vento e do mar (Ferreira, 2000).

### **2.1.2. Cargas de impacto ou vibrações**

A resistência ao impacto ou vibrações é importante, sobretudo quando o betão está sujeito a forças repetidas e, eventualmente, invertíveis (no seu sentido, ainda que numa mesma direção – caso da ação sísmica). Devido à sua natureza heterogénea, o betão (mais ainda quando armado) pode sofrer destacamento quando submetido a ondas de choque, devido às diferentes velocidades de transmissão com que as ondas atravessam os diferentes materiais: os agregados, a matriz cimentícia e a armadura, quando existente.

Algumas das situações em que ocorrem forças de choque por impacto são (Green, 1964 citado por Neville, 1995):

- Ocorrência de sismos;
- Tensões geradas durante um bombardeamento;
- Cravação de estacas;
- Forças de compressão exercidas por equipamentos nas fundações que os sustentam;
- Manuseamento de peças pré-fabricadas.

### **2.1.3. Retração**

A retração é uma propriedade reológica do betão resultando na diminuição das dimensões de um elemento de betão com o tempo, ou na fissuração do elemento, devido ao desenvolvimento de tensões de tração resultante do constrangimento do movimento do

betão (Neville, 1995).

O betão pode estar sujeito tanto a condições de secagem ambiental como a carregamentos constantes. Estas condições podem refletir-se em variações de volume do betão e estão ligadas à remoção de água da pasta de cimento.

Se a humidade ambiental estiver abaixo do nível de saturação, o betão estará sujeito à uma deformação denominada retração por secagem. Se o carregamento for mantido ao longo do tempo, ocorre a perda da água fisicamente absorvida, ocorrendo uma deformação denominada fluência, simultaneamente.

O fenómeno da retração está ligado a deformações em pastas de cimento, argamassas e betões, independentemente do carregamento, sendo sua principal causa a perda de água da pasta de cimento. A retração pode ocorrer no betão em seu estado plástico ou endurecido.

### **Retração no betão plástico ou fresco**

No estado plástico podem ocorrer o assentamento plástico e a retração plástica. O assentamento plástico está ligado a dois fenómenos: a acomodação das partículas sólidas devido à ação da gravidade, causando a sedimentação e, em sentido contrário, a exsudação, que representa a movimentação do ar aprisionado e da água e sua evaporação.

A sedimentação pode provocar fissuras nos primeiros momentos após o lançamento do betão, devido à presença de obstáculos como armaduras ou agregados maiores que impedem a movimentação homogénea das partículas sólidas.

A retração plástica é devida a perda de água do betão ainda não endurecido, por causa da exposição da sua superfície ao exterior, como (i) vento, (ii) baixa humidade relativa do ar e (iii) altas temperaturas, as quais podem levar também à fissuração, denominada dissecação superficial.

A ocorrência deste fenómeno será tão mais intensa quanto maior for o consumo de cimento, a relação A/C e as proporções de finos no betão, estando ligado ao fenómeno da exsudação. Se a evaporação da água da superfície for mais rápida que a exsudação, podem ocorrer

fissuras por retração plástica (Hasparyk *et al.*, 2005).

### **Retração no betão endurecido**

As fissuras no betão endurecido, devidas à movimentação da água, podem ser resumidas basicamente em retração autógena e retração por secagem, existindo também retração por carbonatação e por origem térmica. A retração autógena é definida como a remoção da água dos poros pela hidratação do cimento ainda não combinado, com a redução volumétrica macroscópica dos materiais cimentícios após o início de presa, sem que ocorra mudança de volume devido à perda ou ao ingresso de substância. Este fenómeno tornou-se importante com o advento do betão de alto desempenho, por representar uma das suas principais causas de fissuração.

O mecanismo de retração autógena pode ser explicado por meio da retração química e auto-dissecação. A primeira ocorre com a hidratação do cimento Portland, quando o volume total de sólidos e líquidos diminui devido às reações químicas, enquanto a dissecação ocorre pela diminuição da humidade relativa no interior do betão endurecido, sem qualquer perda de massa, devido ao consumo de água pela reação de hidratação. Desta maneira, formam-se inclusões cristalinas cujos esforços resultantes da tensão superficial levam à retração autógena.

A retração autógena num betão comum, desenvolvida nas primeiras 24 horas, é desprezável quando comparada com a retração por secagem. Já no betão de elevado desempenho a retração autógena é intensa e mais importante que a retração de secagem nas primeiras idades.

A retração por secagem, ou retração hidráulica, é definida como a diminuição do volume da peça de betão devido à remoção da água da pasta endurecida de cimento, quando o betão “seca” pelo contacto com o ar. O fenómeno é natural e ocorre como consequência da hidratação dos compostos anidros dos cimentos Portland. Para a explicação do fenómeno é importante saber que existem diversos tipos de água e com graus diferentes de dificuldade para serem removidos, como água livre, água capilar, água inter-lamelar (água de gel), água absorvida e água de cristalização.

A água livre é toda a água que está na pasta de cimento ou no betão, sem sujeição a qualquer força, ficando livre para evaporar durante o endurecimento da pasta e do betão.

A água capilar pode ser livre ou retida por tensão capilar. A primeira se localiza em grandes vazios, de diâmetro maior que 50 mm, e sua remoção não causa retração no sistema, enquanto a segunda se localiza em diâmetros menores (5 a 50 mm) e sua remoção pode causar retração.

A água absorvida está próxima à superfície dos sólidos da pasta, com as suas moléculas fisicamente absorvidas na superfície desta. Pode ser perdida por secagem da pasta a 30% de humidade relativa e sua perda é a principal responsável pela retração da pasta por secagem.

A água de cristalização, ou quimicamente combinada, é parte integrante da estrutura de vários produtos hidratados de cimento. Esta água não é perdida por secagem, apenas por aquecimento a partir da decomposição dos hidratos.

A retração por carbonatação, fenómeno que será detalhado posteriormente, é provocada pela reação do  $\text{CO}_2$  com os produtos hidratados, que além de neutralizar a natureza cristalina da pasta de cimento hidratado causa a sua retração. Quando o  $\text{CO}_2$  é fixado pela pasta de cimento, a massa deste aumenta. Consequentemente, também aumenta a massa do betão. A retração deve-se, provavelmente, à dissolução dos cristais de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  enquanto sujeito a tensões de compressão e à deposição de  $\text{CaCO}_3$  nos locais livres de tensão. Por este motivo, a compressibilidade da pasta de cimento é aumentada temporariamente.

A retração por origem térmica é devida ao calor gerado durante a hidratação do cimento Portland, que causa tensões térmicas que tracionam o betão na fase de resfriamento. Estes problemas ocorrem principalmente em estruturas massivas, onde o esfriamento à temperatura ambiente pode levar à fissuração (Hasparyk et al, 2005).

#### **2.1.4. Temperatura**

A variação de temperatura provoca uma mudança volumétrica nas estruturas de betão. Se as contrações e expansões são restringidas, e as tensões de tração resultantes forem maiores que a resistência do betão, poderão ocorrer fissuras.

Normalmente são as variações térmicas bruscas que provocam danos sobre as estruturas, em que se verifica que a temperatura da superfície da estrutura se ajusta rapidamente, enquanto a do interior da estrutura se ajusta lentamente. Os sintomas visuais típicos produzidos pelas tensões podem ser observados em superfícies, tal como o destacamento do betão, provocado pelos choques térmicos resultantes de gradientes de temperatura muito acentuados que surgem entre uma superfície muito quente e o interior frio.

Em elementos de betão com grandes dimensões, como por exemplo, barragens ou blocos de fundação, poderão surgir fissuras devido aos efeitos do gradiente térmico causado pelo calor de hidratação do cimento, que pode originar tensões de tração (Ferreira, 2000).

### **2.1.5. Ciclos de gelo-degelo**

Quando a água congela o seu volume aumenta 9%, o que provoca tensões, fissuras e desagregações. Apesar destes fenómenos não serem tão comuns em Portugal, eles são importantes nos países atingidos por baixas temperaturas durante o inverno.

Os efeitos destes fenómenos sobre o desempenho do betão dependerão do seu estágio de endurecimento. Se ocorrer o congelamento antes do endurecimento, o processo de hidratação do cimento será suspenso, sendo retomado após o descongelamento, sem perda significativa da resistência, apesar da expansão interna da água. Se o congelamento ocorrer após o endurecimento do betão, mas sem que ele tenha atingido sua resistência final, a expansão devido ao congelamento da água resultará em perdas significativas de resistência (Aguar, 2006). A rotura do betão ocorrerá quando a pressão de expansão exceder a resistência à tração do betão (Evangelista, 2004).

Quando o betão endurecido é exposto a baixas temperaturas, a água retida nos poros capilares congela e expande. Ao descongelar, verifica-se um acréscimo expansivo nos poros, que aumenta com a sucessão de ciclos, causando uma pressão de dilatação que provoca fissuração no betão, e conseqüentemente sua deterioração (Ferreira, 2000).

Uma solução eficaz para reduzir o risco de danos no betão pela ação do congelamento é a incorporação de ar, cerca de 4 a 6% na mistura do betão, em função da classe de exposição ambiental, através de aditivos (Moreira et al, 2007).

Emmons (1993) menciona que a deterioração provocada pela ação do gelo-degelo ocorre principalmente em superfícies horizontais que são expostas à água, ou em superfícies verticais localizadas no nível da água em porções de estruturas submersas.

Atualmente, acredita-se que os efeitos das geadas no betão se devem à pressão osmótica. Segundo esta tese, somente uma parte da água existente nos poros está sujeita ao congelamento à uma determinada temperatura. As águas dos pequenos poros e a solução de alta alcalinidade congelam somente com temperaturas muito baixas. Para alcançar o equilíbrio do sistema, ocorre a migração da água e da solução, gerando a pressão osmótica, que se for maior que a resistência do betão, provoca a sua fissuração (Silva, 1998).

A degradação do betão pode ocorrer também pela aplicação de sal para acelerar o degelo. As ações de cloros neste processo podem ser danosas ao betão, contribuindo para a sua degradação em função dos mecanismos de corrosão das armaduras (Cody, 1996). A aplicação do sal produz também uma redução da temperatura na superfície do betão causando um choque térmico, além de tensões internas que podem provocar fissuras devido diferença de temperatura entre a superfície e o interior do betão (Silva, 1998).

Não existe método normalizado para a determinação da resistência do betão aos ciclos de gelo-degelo. Existem apenas recomendações para os procedimentos de ensaio de determinação da resistência do betão a ciclos acelerados de gelo-degelo em duas condições distintas: (i) o gelo-degelo é efetuado dentro de água; e (ii) o gelo é efetuado ao ar livre e o degelo dentro de água (Powers, 1955) citado por Neville (1995).

### **2.1.6. Desgaste por abrasão, erosão e cavitação**

A abrasão é o processo que causa desgaste superficial no betão por esfregamento, escorregamento ou fricção constante, sendo particularmente importante no estudo do comportamento de pisos industriais, pavimentos rodoviários e de pontes (Bauer, 2002), bem como em galerias (Aguiar, 2006). A Figura 3-a) ilustra um exemplo desta patologia.

A resistência superficial e a dureza do betão influenciam o desgaste por abrasão. As propriedades do betão na zona superficial estão diretamente relacionadas com a resistência à compressão e com o conteúdo cimentício, sendo inversamente proporcional à razão A/C,

independentemente da qualidade do agregado. A utilização de agregados grossos mais resistentes e o aumento da resistência à compressão elevam a resistência à abrasão do betão (Almeida, 2003). Uma adequada cura deve ser definida, dado que aumenta a resistência a agentes abrasivos. A NP EN 206 recomenda que o período de cura seja o dobro do normal de modo a obter uma boa resistência à abrasão.

A erosão é importante para as estruturas sujeitas ao desgaste pelo escoamento das águas, sendo necessário separar o desgaste provocado pelo transporte de partículas finas pela água dos estragos causados pela cavitação. Enquanto a erosão é o desgaste causado pela passagem abrasiva dos fluidos contendo partículas finas suspensas, conforme mostrado na Figura 3-b), a cavitação é a degradação da superfície do betão causada pela implosão de bolhas de vapor de água quando a velocidade ou direção do escoamento sofre uma mudança brusca (Andrade, 1992).



**Figura 3. Desgaste em galerias de águas pluviais por: (a) abrasão na laje de fundo e b) erosão, próximo de um degrau (Aguiar, 2000)**

O escoamento laminar de água, normalmente não danifica o betão, mas a erosão provocada por partículas grossas, como areia ou brita, pode ser tão severa como a cavitação, que tende a aumentar com a perda da camada superficial do betão, que normalmente é mais resistente que as camadas inferiores (Liu, 1981).

### **2.1.7. Exposição ao fogo**

Quando o betão é exposto a determinadas temperaturas, como as que são atingidas durante um incêndio, os efeitos sobre os materiais e elementos estruturais devem ser considerados.

O efeito de um incêndio no betão depende das temperaturas atingidas e o intervalo de tempo durante o qual a temperatura é mantida, bem como (i) as características do betão; (ii) o tipo de cimento; (iii) a razão A/C; (vi) o tipo de agregados; (v) a dosagem de cimento e (vi) a espessura do recobrimento (Zoldners, 1960, citado por Ferreira, 2000).

Não é fácil qualificar e quantificar o desempenho do betão durante um incêndio devido a vários fatores, tais como (Neville, 1995):

- Diferenças no tipo de tensões a que o betão pode estar sujeito, por variações uniformes e diferenciais de temperatura ao longo da peça (espessura e eixo);
- Teor de humidade do betão, antes e durante o aquecimento;
- Diferenças no tempo de exposição e valor das temperaturas atingidas;
- Diferenças nas propriedades dos agregados e presença da armadura.

Devido a estes fatores, verifica-se que existe uma grande dispersão nos valores da perda da resistência do betão em função da temperatura. A Tabela 2 mostra a variação da resistência à compressão para temperaturas diferentes, em função da resistência aos 28 dias à temperatura ambiente.

<b>Tabela 3. Resistência à compressão como percentagem da resistência aos 28 dias (Neville, 1995)</b>					
Temperatura máxima (°C)	20	200	400	600	800
Gama de resistência residual (%)	100	50-92	45-83	38-69	20-36

A variação da resistência de betão estrutural devidamente fabricado (segundo a normalização aplicável) é incipiente para temperaturas até 300 °C. Contudo, é grandemente afetada para temperaturas superiores (Gutt, 1997). Com a subida da temperatura, a resistência começa a diminuir devido à desidratação dos componentes do cimento. À medida que a temperatura sobe para 400 °C, o hidróxido de cálcio decompõe-se, restando apenas cal. Como temperaturas superiores a 900 °C são comuns em incêndios, as camadas superficiais serão sempre danificadas, sendo o grau dos danos (devido ao destacamento) dependente do gradiente de temperatura entre a superfície do betão e o interior. Obviamente

que, tratando-se de betão armado, a questão da perda de resistência e deformabilidade excessiva também se coloca neste material, sobretudo a partir de 400 °C.

Normalmente, ocorre destacamento da superfície do betão, estando esta crestada, a que acresce a dilatação das armaduras (quando existentes) pressionando o recobrimento do betão (nunca muito espesso, em geral, ainda que a sua dimensão esteja ligada à resistência do betão armado ao tempo de manutenção desta propriedade no tempo). Ao descascar o betão superficial, o betão interno fica exposto bem como as suas muitas fendas aleatórias. A maioria das fendas são superficiais, no entanto, algumas podem propagar-se para o interior do betão atravessando a matriz cimentícia e, mesmo, os agregados.

Como a dilatação térmica da armadura é superior ao betão, desenvolvem-se tensões devido ao aumento do volume da armadura, surgindo fendas em torno desta, especialmente em secções fortemente armadas, o que resulta em destacamento explosivo do betão. A formação das fendas efetua-se nos planos da armadura. Uma vez exposta, a armadura serve de condutor de calor e acelera a degradação do betão. Na Figura 4, observa-se a deterioração das armaduras após o destacamento do betão de recobrimento durante um incêndio.



**Figura 4. Fotografia do teto da sala do antigo gerador em Turow, após o incêndio, na Polónia em 1999**

A perda de resistência à compressão é muito mais pequena para razões A/C de 0.60 do que em betões com razões A/C de 0.45, podendo a tendência ser alterada para betões com razões A/C de 0.33 (Carette e Malhotra, 1983). Betões com agregados leves exibem uma perda mais baixa de resistência à compressão do que betão normal, uma perda residual de 50% após exposição a 600°C (Sarshar e Khoury, 1993, citado por Ferreira, 2000). Ensaio em betões de elevada resistência (89 MPa) sugerem uma perda relativa superior (> 50%) à do betão normal. Nos betões de elevada resistência, que contêm sílica de fumo, ocorre o destacamento explosivo quando exposto a temperaturas razoavelmente elevadas (300 °C) (Dan et al, 1991, citado por Ferreira, 2000).

A resistência à compressão do betão ao incêndio é geralmente governado pelos três seguintes fatores:

- A quantidade de água quimicamente ligada que se perde durante a exposição ao fogo;
- Alterações químicas que destroem a ligação entre a pasta de cimento e o agregado;
- A degradação gradual da pasta de cimento endurecido.

Os agregados expandem-se progressivamente quando aquecidos, enquanto a pasta de cimento apenas se expande até determinado ponto e depois começa a retrair-se (presença de água intersticial). O efeito combinado de agregado expansivo e pasta de cimento a retrair, conduz à redução de resistência do betão, e conseqüentemente, o aparecimento de fendas.

Em geral, betões com elevados coeficientes de dilatação térmica são menos resistentes às variações de temperatura do que os betões com coeficientes baixos (Neville e Brooks, 1997). Misturas pobres em cimento aparentemente sofrem menor perda de resistência que misturas ricas. A resistência à flexão (ligada diretamente à tração) é mais afetada do que a resistência à compressão, sendo a perda de resistência muito menor quando o agregado não possui sílica (Malhotra, 1956).

O betão normal, feito com agregado silicioso ou calcário, apresenta uma mudança de cor não permanente, que reflete a temperatura máxima atingida durante o incêndio. Como esta alteração depende da presença de determinados compostos de ferro, existem diferenças nas

respostas de betões diferentes. A resistência residual pode ser avaliada de forma aproximada, da seguinte forma: (i) betão exposto a temperaturas entre 300°C e 600°C apresenta uma cor avermelhada ou cor-de-rosa; (ii) até 900°C o betão apresenta uma cor cinzenta e (iii) acima de 900°C é esbranquiçado (Zoldners, 1960; Neville, 1995). Assim, o betão cor-de-rosa é suspeito e betão no estado cinzento está provavelmente friável e poroso.

## 2.2. Processos químicos

O contacto do betão com ácidos em altas concentrações não é habitual. Já a ação de chuvas ácidas nos grandes centros e nas áreas industriais é mais frequente.

Os ácidos sobre o betão atuam destruindo o seu sistema poroso e produzindo uma transformação completa na pasta de cimento endurecida. O resultado destas ações é a perda de massa e uma redução da secção do betão. Esta perda acontece em camadas sucessivas, a partir da superfície exposta, sendo a velocidade da degradação proporcional à quantidade e concentração do ácido em contacto com o betão (Andrade, 2003), conforme Figura 5.



**Figura 5. Ataque químico deteriorou severamente uma viga de betão numa indústria química (Andrade, 2003)**

Os fluidos agressivos podem penetrar nos poros do betão de três formas: (i) difusão, resultado da diferença de concentrações iónicas entre os fluidos externos e internos; (ii) por

pressão hidrostática, resultado da diferença de pressão dos fluidos; (iii) por forças capilares, resultado de mecanismo capilares (Ferreira, 2000).

A penetração pode ser resultado também de uma combinação de forças, que podem ser influenciadas por temperaturas, correntes elétricas, entre outros (Ferreira, 2000).

As reações químicas se manifestam através de efeitos físicos nocivos, tais como (i) o aumento da porosidade e permeabilidade, (ii) diminuição da resistência, (iii) fissuração e (iv) destacamento.

Atenção especial deve ser dada ao ataque de sulfatos, ataque por álcalis-agregado e corrosão das armaduras, uma vez que estes fenómenos são responsáveis pela deterioração de um grande número de estruturas de betão (Mehta et al, 1994).

### **2.2.1. Sulfatos**

Os sulfatos podem ter origem interna, nos materiais que compõe o betão, ou externa, no contacto do betão com os solos ou águas ricas com este agente. O ataque produzido por sulfatos é devido a sua ação expansiva, que pode gerar tensões capazes de o fissurar. Os sulfatos podem estar na água de amassadura, nos agregados ou no próprio cimento. Os sulfatos podem penetrar desde o exterior por difusão iónica ou por sucção capilar (Silva, 1998).

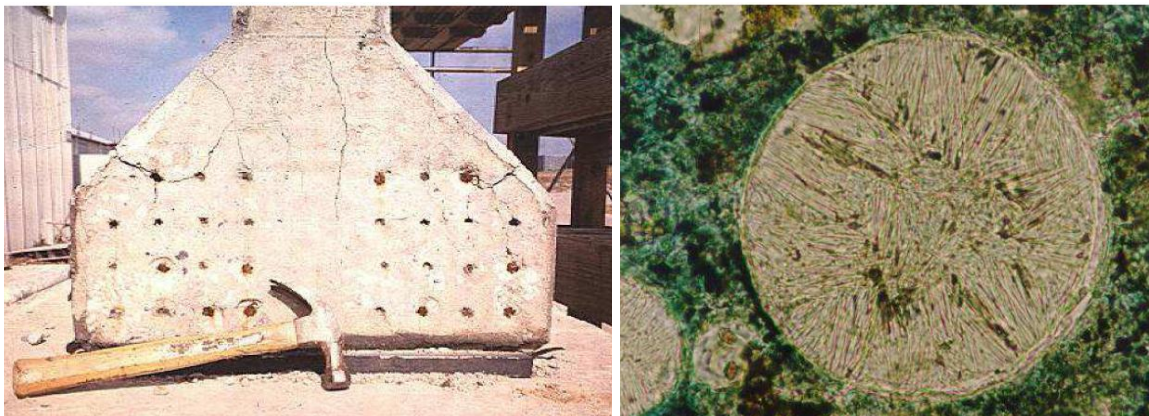
A presença de sulfatos solúveis, principalmente aqueles de sódio, cálcio e magnésio, é comum em áreas de operação de minas e indústrias químicas. O sódio e o cálcio são os sulfatos mais comuns nos solos (ver Figura 6), águas e processos industriais. Sulfatos de magnésio são mais raros, porém mais destrutivos.

O ataque de sulfatos leva a uma expansão e fendilhação da pasta de cimento endurecido por um processo associado à formação de etringite (ver Figura 7). Esta formação de etringite é normalmente designada por secundária, em oposição à criada nos instantes iniciais de hidratação de cimento que não possui uma ação expansiva. A composição da etringite, sulfoaluminato de cálcio hidratado, é produzida pela reação química entre o hidróxido de cálcio e os compostos de alumina presente na pasta de cimento com os iões de sulfatos

vindos do meio envolvente ou, eventualmente, a partir dos próprios constituinte do betão, nomeadamente a partir da oxidação dos agregados com inclusões piríticas (Reis et al., 1999). De facto, pode formar-se etringite mesmo em cimentos com baixo teor de aluminato tricálcico ( $C_3A$  – um dos compostos mais importantes na resistência do betão e argamassas hidráulicas), caso a alumina reativa seja proveniente dos agregados, tal como no caso dos agregados que contenham feldspatos alterados (Gonçalves et al, 1999).



**Figura 6. Exemplos de ataque de sulfatos de origem externa (Costa, 2011)**



**Figura 7. Exemplos de ataque de sulfatos de origem interna numa viga (Costa, 2011)**

Estudos levados a cabo pelo LNEC, desde a década de 50, devido a problemas existentes em estruturas portuárias em Leixões e Viana do Castelo, levaram à conclusão de que a degradação do cimento Portland ocorria quando os agregados eram provenientes de granitos que continham feldspatos caulinizados. Este fato é explicado pela formação de

sulfoaluminato de cálcio expansivo, como resultado da ação dos iões sulfatos no feldspato caulinizado alcalino (Gonçalves, et al, 1999).

A quantidade de etringite formada depende da resistência das forças expansivas geradas e da capacidade do material lhe resistir.

Há, conseqüentemente, uma redução da capacidade de fixação da pasta de cimento resultando numa perda de resistência do betão.

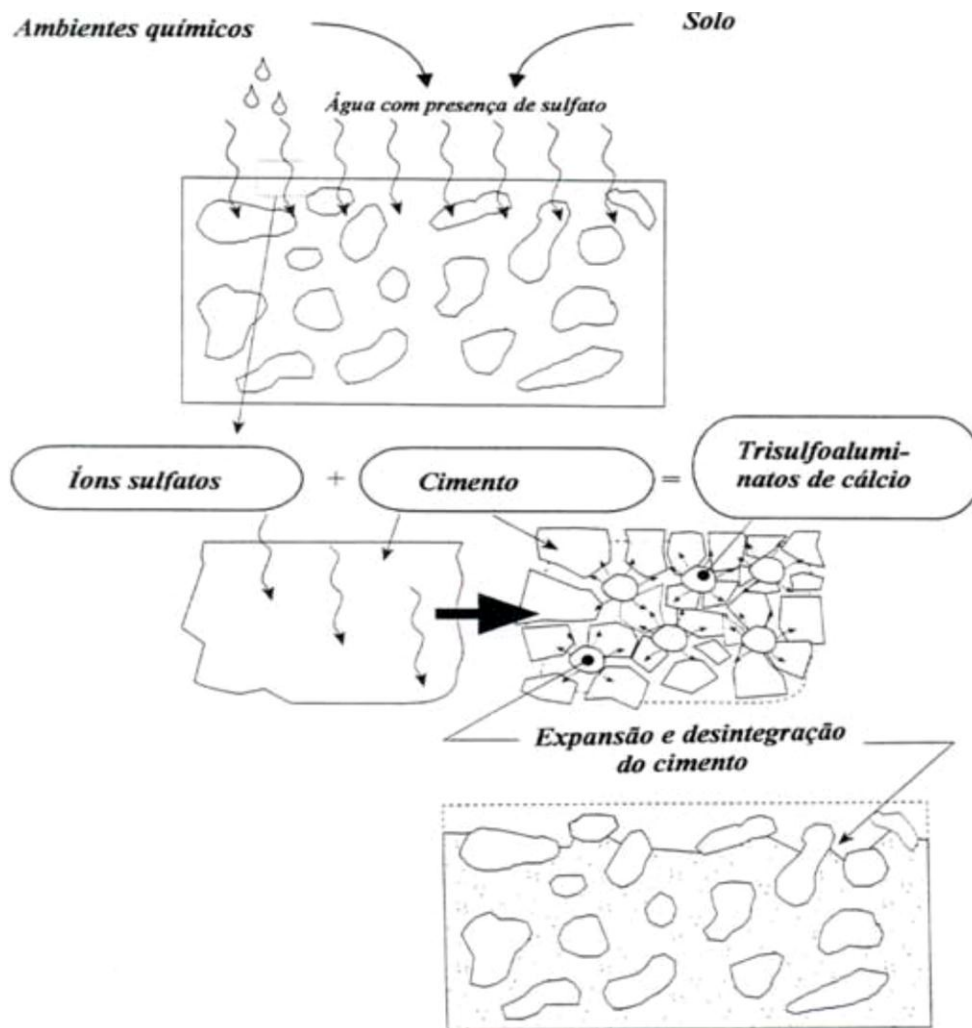


Figura 8. Desintegração do betão por ataque de sulfatos (Emmons, 1993)

Para além da etringite, poderá formar-se gesso no betão quando sujeito ao ataque prolongado de soluções de sulfatos agressivas, tais como sulfatos de magnésio, resultante

da decomposição progressiva dos hidratados de hidróxido de cálcio e silicato de cálcio. Este ataque leva à redução da rigidez e da resistência do betão. A formação retardada da etringite pode ser considerada como uma forma interna de ataque dos sulfatos, provocada pela temperatura de cura inadequada e/ou armazenamento do cimento Portland, que resulta numa remobilização dos sulfatos inicialmente retidos na matriz cimentícia. A formação retardada da etringite é claramente um processo expansivo, marcado pela expansão de volume dos membros do betão afetados, e pelo desenvolvimento de fendilhação geral. É influenciada pela composição do betão, as condições de cura e de exposição (Diamond, 1996, citado por Reis et al., 1999).

Do parágrafo anterior mais uma vez fica evidenciada a necessidade da quantidade de água da mistura A/C ser a estritamente necessária à hidratação do ligante cimento, bem como o cuidado a colocar na amassadura, conquanto permita uma mistura efetiva destes dois importantes componentes do betão.

Todos os sulfatos são potencialmente danosos ao betão, reagindo com a pasta de cimento hidratado. No ataque, os iões sulfatos reagem principalmente com o hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$  e o aluminato tricálcico  $\text{C}_3\text{A}$ , originando a etringite e o gesso. Esta formação expande-se, exercendo pressão e desintegrando a pasta de cimento.

Pode-se aumentar a resistência do betão contra o ataque de sulfatos através da redução do fator A/C, com o uso de cimento resistente à sulfatos, com baixo teor de aluminato tricálcico e com a introdução de proporções adequadas de sílica ativa e cinzas volantes (Emmons, 1993).

### **2.2.2. Cloretos**

A literatura sobre durabilidade frequentemente aponta a ação dos iões cloretos como um dos principais causadores da corrosão das armaduras do betão.

Os iões cloretos podem chegar até ao betão através de diversas formas, como uso de aceleradores de presa que contêm  $\text{CaCl}_2$ , impureza na água de amassadura e nos agregados, água do mar e maresia, sais de degelo e processos industriais.

Existe muita controvérsia a respeito da quantidade de iões cloretos suficientes para romper a camada de óxidos passivantes e iniciar o processo de corrosão das armaduras. Este limite não está associado a um valor fixo, embora algumas normas recomendem alguns valores indicativos.

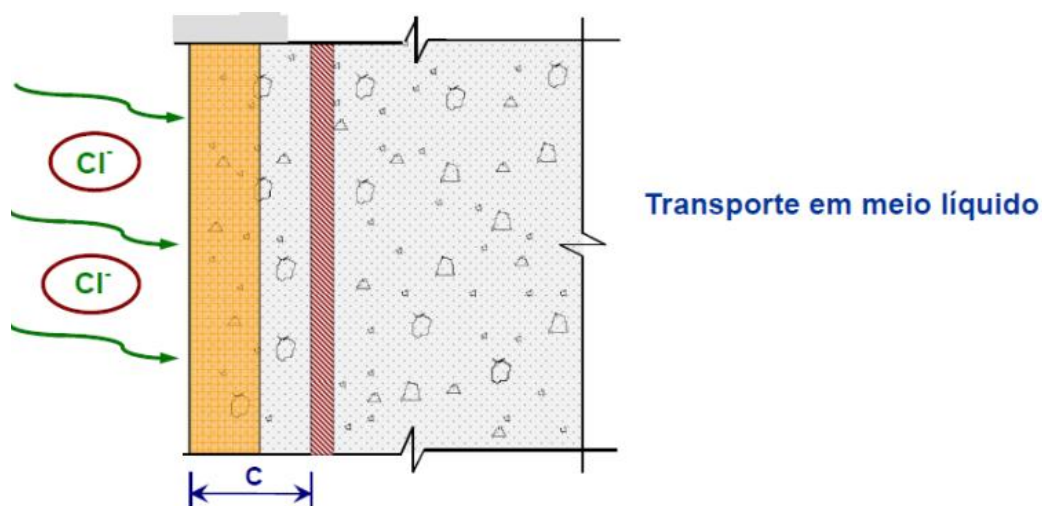


Figura 9. Esquema da penetração dos cloretos (Costa, 2011)

A NBR 6118 (2003) não se reporta ao teor de cloretos, chamando somente a atenção quanto ao uso de aditivos contendo cloretos. As Normas Europeias CEB (1991), ENV 206 (1991) e a BS 8110:1 (1985) recomendam um limite de 0,40% em relação à massa de cimento, enquanto a ACI 318-21 (2003) limitam em 0,15% em ambientes com cloretos, 0,3% em ambientes normais, 1% em ambientes secos e 0,06% em betão protendidos (Figueiredo, 2005). De notar que algumas destas normas já foram atualizadas, face à bibliografia que as identifica (Figueiredo, 2005), mas estas percentagens não sofreram alterações apreciáveis (veja-se Quadro 10 – Máximo teor de cloretos do betão – e Quadro 2/DNA – Classes de teor de cloretos do betão - da NP EN 206/2007).

Basicamente, os parâmetros que influenciam a penetração de cloretos são os mesmos para a penetração do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). O tipo de cimento utilizado influencia a concentração de cloros, tendo aqueles com teores mais elevados de aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ) desempenho superior aos cimentos com baixos teores de  $\text{C}_3\text{A}$ .

A relação A/C, adensamento e cura são fatores significativos que influenciam a qualidade do betão e têm relação direta com a penetração de cloretos.

Em condições reais, a penetração de cloretos ocorre através da associação dos vários mecanismos de transporte, como mostra a Figura 10. Para haver transporte por difusão é necessário que os poros contêm água. As fissuras no betão favorecem a penetração dos cloretos, sendo que a velocidade depende da abertura das fissuras e da qualidade do betão.

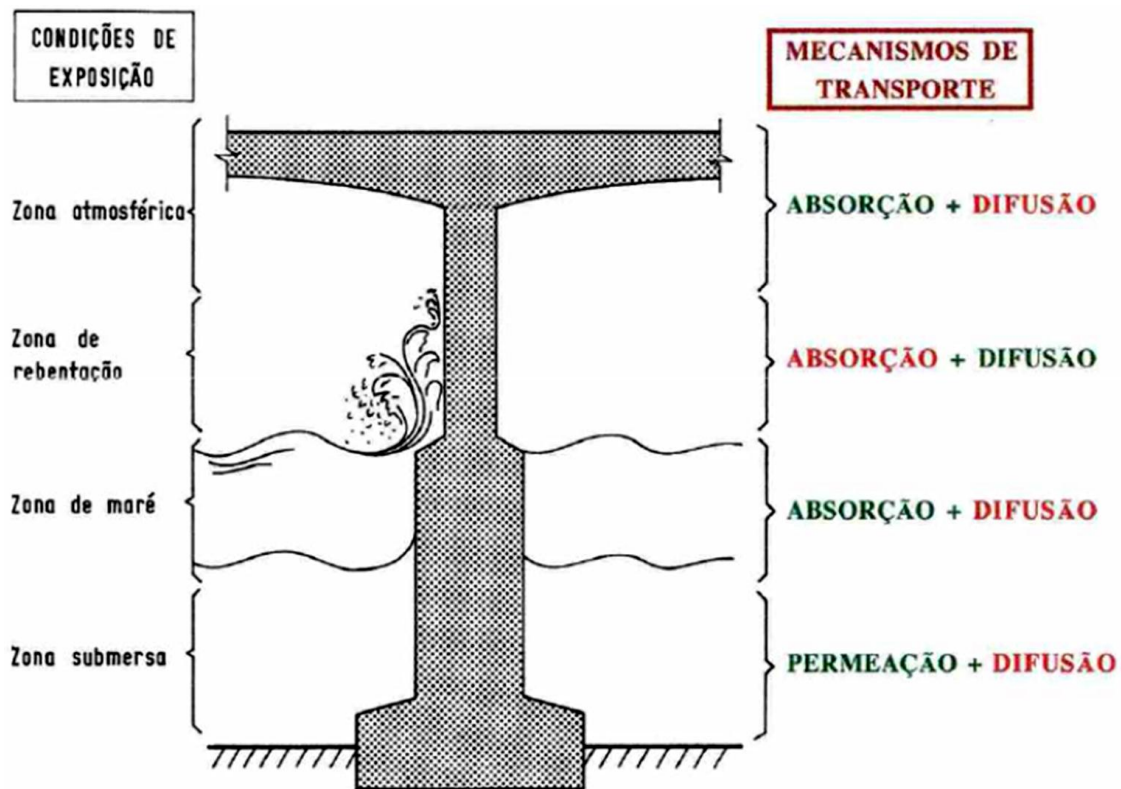


Figura 10. Esquema dos vários mecanismos de penetração dos cloretos (Costa, 2011)

A concentração de cloretos necessária para promover a corrosão é fortemente afetada pelo pH do betão. Foi demonstrado que é necessário um nível de 8000 ppm (1/1000000 ou 1ppm = 0.0001%) de iões cloretos para iniciar o processo quando o pH é de 13.2, mas quando o pH cai para um patamar de 11.6, a corrosão inicia-se com apenas 71 ppm de iões cloretos (Emmons, 1993).

Portanto, os efeitos da interação da carbonatação com os iões cloretos levam a uma aceleração da velocidade de corrosão, quando comparada com a ocorrência dos ataques de

forma independente, conforme mostra a Figura 11.

O aumento da temperatura eleva a mobilidade molecular e favorece o seu transporte pela microestrutura (Figueiredo, 2005).



**Figura 11. Pilar sobre o mar após 10 anos de construção, deteriorado devido aos efeitos da interação da carbonatação com iões de cloretos (Aguiar, 2006)**

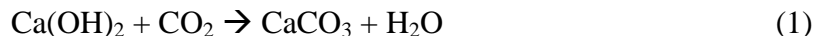
Para a determinação do teor de cloretos no betão são utilizados diferentes métodos, geralmente divididos em dois grupos: (i) medição da relação cloretos totais/livres e (ii) medição da relação cloretos fixos/livres. O número total de cloretos é soma de iões livres mais fixos.

O cloreto livre existe na solução intersticial, sendo de fácil extração, enquanto o fixo é fortemente absorvido pelas paredes dos poros, sendo quimicamente ligado à matriz cimentícia, originando os cloro-aluminatos (Ferreira, 2000).

### **2.2.3. Carbonatação**

O dióxido de carbono,  $\text{CO}_2$ , presente na atmosfera tem uma tendência notável para se combinar com as bases do cimento hidratado, resultando compostos com pH mais baixos.

A ação do CO<sub>2</sub> sobre os constituintes do cimento hidratado é complexa, pois não se limita ao hidróxido de cálcio, mas ataca e degrada todos os produtos da hidratação do cimento. O betão é um material poroso e o CO<sub>2</sub> do ar penetra pelos seus poros. A reação mais simples e importante é a combinação com o hidróxido de cálcio libertado pela hidratação do cimento:



O betão possui um pH da ordem de 12.5, principalmente por causa do Ca(OH)<sub>2</sub>. O desaparecimento do hidróxido de cálcio do interior dos poros da pasta de cimento hidratado, e sua transformação em carbonato de cálcio, faz baixar o pH da solução em equilíbrio de 12.5 para 9.4, fator determinante para o início da corrosão das armaduras. Quando todo o carbonato de cálcio estiver carbonatado, o valor do pH é reduzido para 8.3 (Papadakis e Fardis, 1992).

O CO<sub>2</sub> penetra da superfície para o interior, pelo que a carbonatação inicia-se na superfície do betão e penetra lentamente para seu interior. Em betão de qualidade média verifica-se que a velocidade da carbonatação varia entre 1 e 3 mm por ano (Silva, 1995). Observa-se na Figura 12 que a intensidade da corrosão devido à carbonatação é influenciada pela espessura do recobrimento, sendo que a corrosão inicia-se nas armaduras onde as espessuras da camada de recobrimento são menores.

A carbonatação no betão e argamassas hidráulicas é grandemente influenciada pela concentração de CO<sub>2</sub>, sendo a velocidade do processo função da sua difusão, da humidade relativa, do tempo, da relação A/C, do tipo de cimento, e da permeabilidade do betão e cura. Assim, a velocidade com que a carbonatação se desenvolve depende do teor de humidade da estrutura e da humidade relativa nas imediações da estrutura. Para que a carbonatação progrida a humidade deve ser combinada com o CO<sub>2</sub>, pelo que a humidade relativa do ar vai determinar a velocidade de carbonatação (Emmons, 1993).

O grau de carbonatação máximo ocorre a uma humidade relativa de 60%, enquanto que num ambiente seco ou saturado a carbonatação é reduzida para 20% deste valor.

Se o betão tem todos os seus poros cheios de água, o gás carbónico não pode penetrar e difundir-se. Por outro lado, se todos os poros estão secos, o gás carbónico não pode ionizar-

se, e se o fizer, a carbonatação será realizada muito lentamente (Silva, 1995). São situações extremas, mas que ambas reduzem o processo de carbonatação.



**Figura 12. Pilar em indústria com corrosão nas armaduras devido à carbonatação (Aguiar, 2006)**

Na Tabela 4 apresenta-se a velocidade de carbonatação com a humidade relativa do ar.

<b>Tabela 4. Variação da velocidade de carbonatação com a humidade relativa do ar (Emmons, 1993)</b>			
Humidade relativa do ar (%)	$\leq 30$	40 a 70	$\geq 75$
Velocidade de carbonatação	Baixa	Elevada	Baixa

#### **2.2.4. Efeito combinado da carbonatação e da ação dos cloretos**

Será fácil aceitar que o efeito combinado da carbonatação e da ação dos cloretos será, no mínimo, de resultado perverso pelo menos idêntico à da pior isolada, em cada caso. Na soma das ações, quando o pH desce para valores inferiores a 10 ou 11, ou o teor de cloretos ultrapassa o valor crítico, ocorre a destruição da película passiva. A despassivação das armaduras origina o início do mecanismo da corrosão, como se ilustra na Figura 13 e 14.

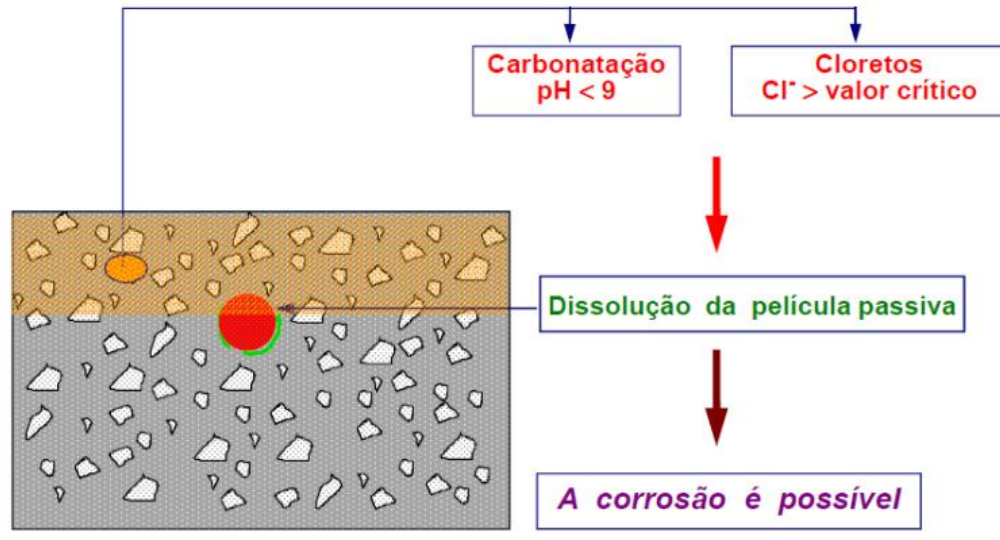


Figura 13. Dissolução da película passiva por efeito da carbonatação e/ou ação de cloretos (Aguilar, 2006)

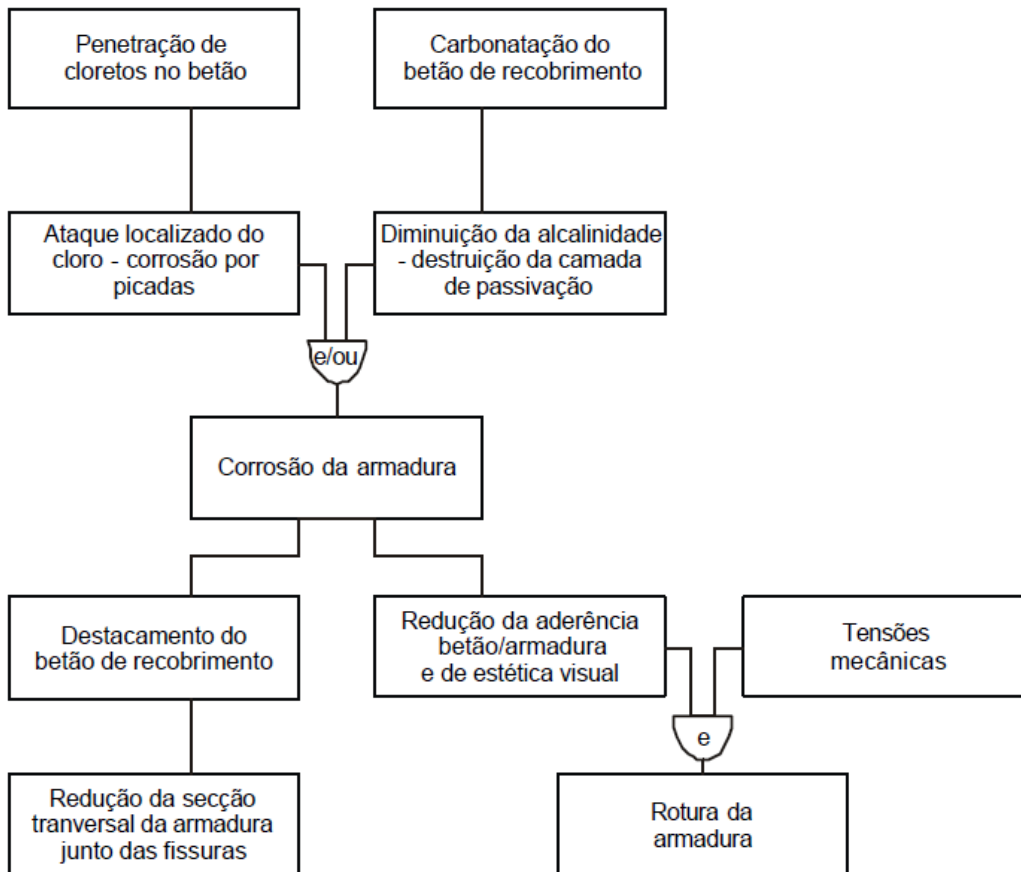


Figura 14. Diagrama em árvore do mecanismo de corrosão da armadura (Ferreira, 2000)

### 2.2.5. Reação álcalis-agregado

O **ataque álcalis-agregado**, também designado álcalis-inerte, ocorre quando o álcalis libertado pelo cimento hidratado reage com os agregados cujos constituintes são reativos. Recordar que os álcalis são, do ponto de vista químico, os elementos que se localizam na primeira coluna da tabela periódica, embora apenas o sódio e o potássio sejam considerados como álcalis na química do cimento.

É conhecido que certos agregados, como algumas formas reativas de sílica, reagem com o potássio, sódio e hidróxido de cálcio do cimento, e formam um gel em volta dos agregados reativos. Quando o gel é exposto à humidade, este expande, criando tensões internas que causam fissuras em torno dos agregados (humidade interna do betão em torno de 80%) (Andrade, 2005). A Figura 15 ilustra este processo.

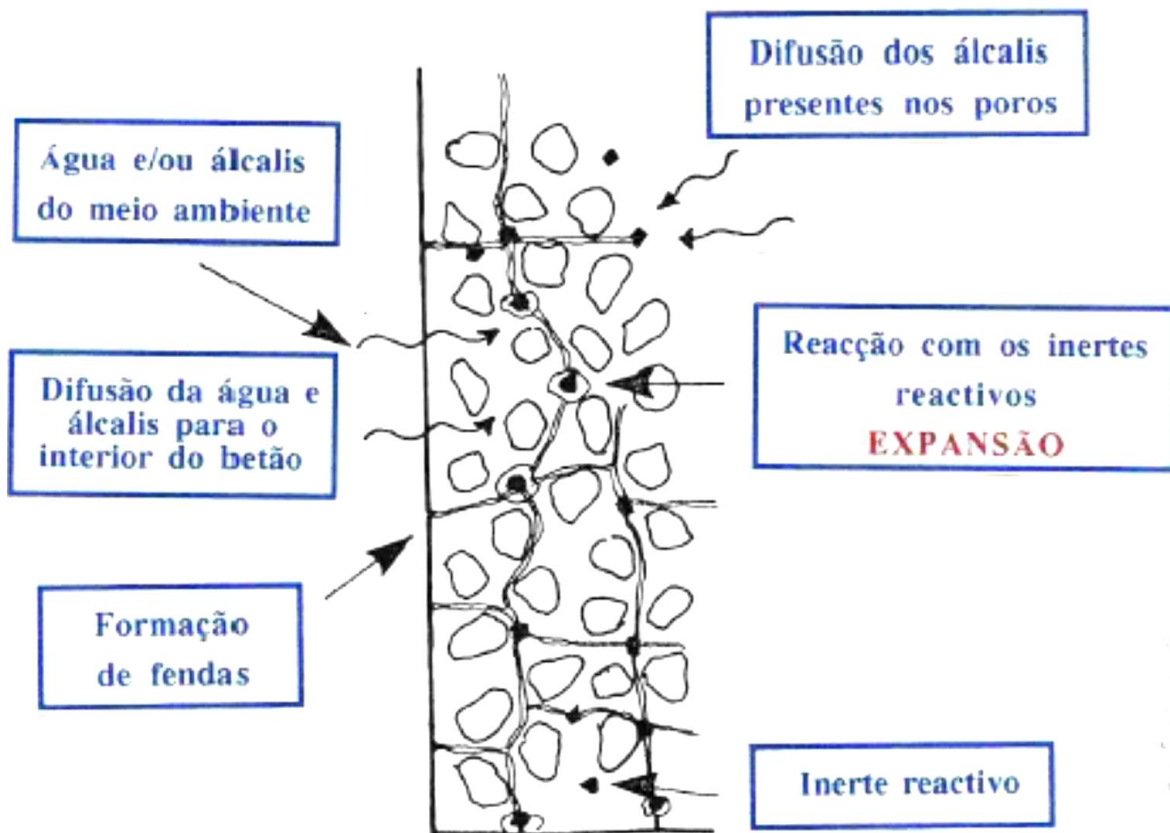


Figura 15. Mecanismo do ataque a reações álcalis-agregado (Costa, 2011)

Geralmente ocorrem três tipos de ataques (Reis e Silva, 1997; Gomes, 2008):

- Ataque álcalis-sílica com agregados siliciosos (calcedónia, opalas, quartzo tectonizado);
- Ataque álcalis-silicato quando em presença de agregados contendo filosilicatos (silicatos laminares, de forma achatada, semelhante ao filler do cimento);
- Ataque álcalis-carbonato envolvendo alguns agregados calcários dolomíticos.

Pelas reações intrínsecas existentes entre as reações álcalis-sílica e álcalis-silicato, sendo a última reação mais lenta, estes dois tipos de reação são frequentemente englobados num mesmo termo genérico de reação álcalis-sílica (RAS) (Reis et al, 1997).

As reações são destrutivas e manifestam-se através de fendilhação. A abertura das fendas pode variar desde 0,1 mm até 10 mm, como se ilustra na Figura 16. A profundidade das fendas raramente excede os 25 mm, atingindo um valor extremo de 50 mm (Ollivier e Baron, 1992, citado por Neville, 1995). Daí que estas reações, na maior parte dos casos, afetam mais a aparência da estrutura do que a sua integridade estrutural (Wood e Johnson, 1993).

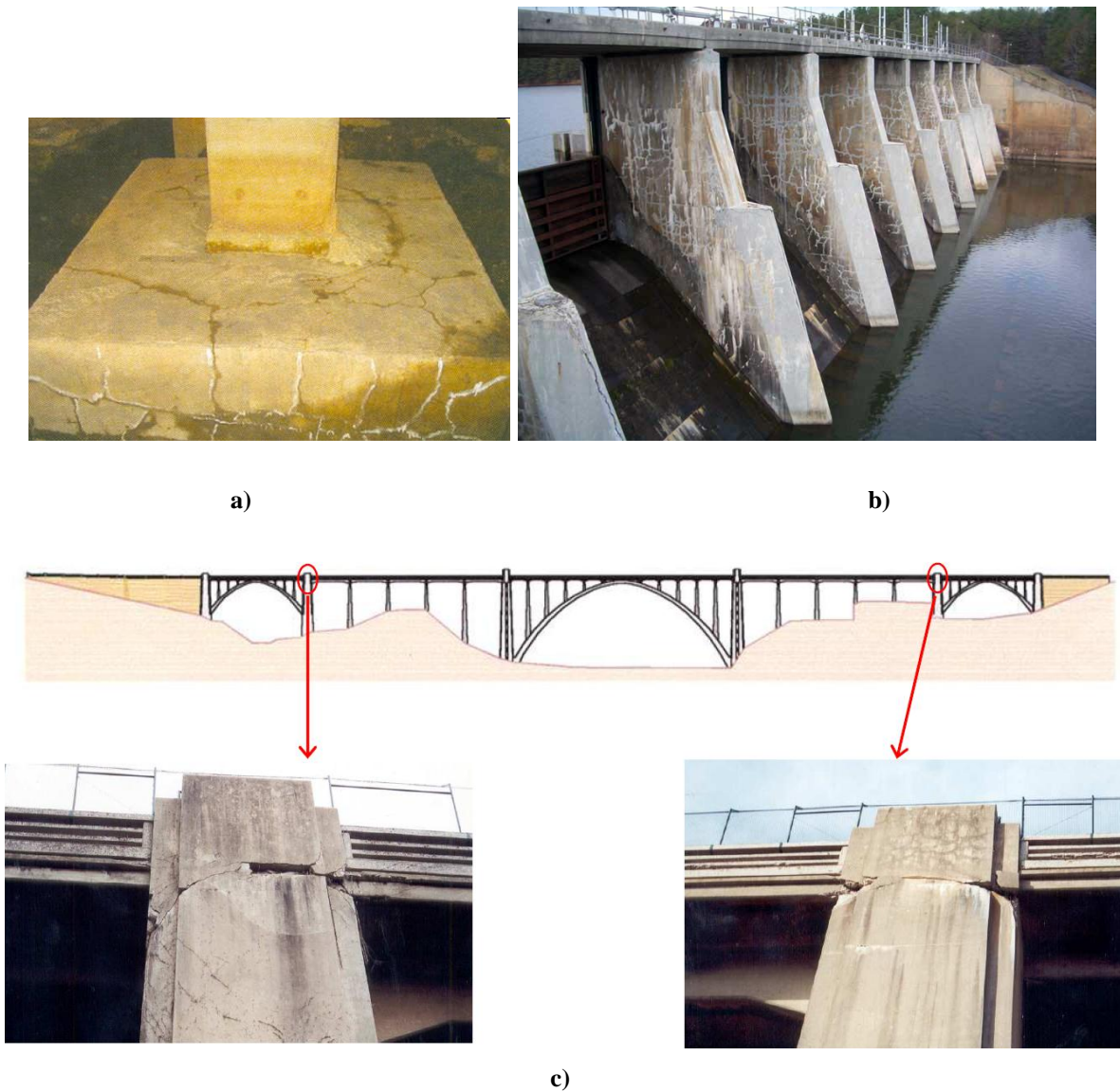
A fendilhação da superfície do betão sujeito à reação álcalis-agregado é irregular, assemelhando-se a uma teia de aranha enorme. Este mapa de fissuras permite a entrada de mais humidade, acelerando ainda mais a reação, conforme se pode ver na Figura 16.

Por forma a avaliar se a fendilhação se deve às reações álcalis-agregado, as fendas, quando abertas, podem ser vistas atravessando as partículas de agregados e pasta de cimento envolvente (Carette e Malhotra, 1983).

A expansão provocada pela reação álcalis-agregado cessa quando o teor de humidade do betão for inferior a 48%, o que corresponde para um valor da humidade relativa de cerca de 85% (Blight, 1991, citado de Neville, 1995).

Atualmente, em Portugal, existe apenas uma recomendação geral relativa à resistência à reação álcalis-agregado na NP EN 206 (2007) e referências a limitações no teor de álcalis

em algumas especificações do LNEC de apoio a essa norma (E372, E373 e E378).

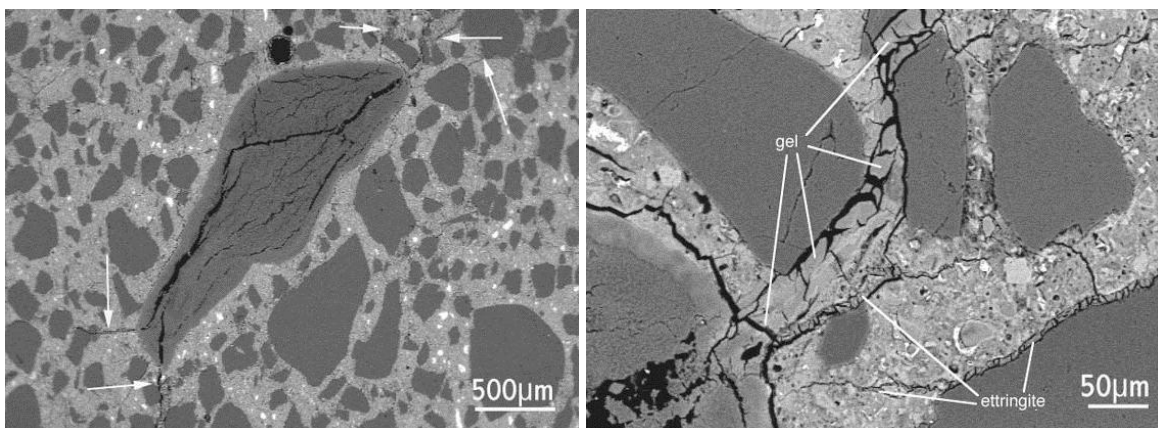


**Figura 16. Exemplos da degradação do betão devido a reações álcalis-agregado em: a) fundações; b) barragens (Penetron, 2008); c) pontes (Costa, 2011)**

#### a) Reações álcalis-sílica

Determinadas rochas siliciosas reagem com o cimento formando um gel: um composto álcalis-sílica de complexidade variável. A álcalis-sílica pode reagir com os iões de cálcio, originando a partir de hidróxido de cálcio ou outros produtos de hidratação do cimento, um complexo branco, opaco de sílica-cálcio ou álcalis-sílica-cálcio. Os produtos das reações de

álcalis-sílica absorvem água e aumentam de volume, transformando-se neste processo de um gel duro e sólido a um gel mole que, finalmente, se dispersa em solução. À medida que mais água é absorvida, a fenda é propagada para o interior do betão e torna-se mais larga. A abertura de fendas normalmente demora muitos anos e é precedida pelo destacamento da superfície de betão (Ferreira, 2000).



**Figura 17. Reação álcalis-sílica: a) Imagem de microscopia eletrónica de partícula agregada de sílex com várias fissuras internas devidas a esta reação, que se estendem ao betão; b) Detalhe do agregado mostrando o gel álcalis-sílica bem como a presença de etringite nas fissuras (Penetron, 2008)**

As condições necessárias para a ocorrência e desenvolvimento destas reações álcalis-sílica são as seguintes (Penetron, 2008):

- Conteúdo alcalino do cimento suficientemente alto;
- Agregado reativo com concentrações dentro duma gama crítica;
- A presença de água, pois esta reação não ocorrerá se não houver água disponível no betão, pois a formação do gel álcalis-sílica precisa de água.

A reação álcalis-sílica só será perigosa quando se verificarem todas as condições. Se algum dos fatores não existir, então, não haverá degradação do betão e não terão que ser tomadas precauções especiais para prevenir a reação álcalis-sílica. Assim, duma maneira ou de outra, todas as especificações que são propostas para evitar a deterioração por reação álcalis-sílica procuram excluir pelo menos um dos três fatores referidos (Reis et al, 1997).

O vidro artificial também pode causar uma reação alcalina (Coutinho, 1998). Os sinais aparentes da reação são as seguintes:

- Alargamento excessivo e deformações desordenadas, causando fissuras em direções que não condizem às tensões instaladas na estrutura;
- Desenvolvimento de crateras mais ou menos profundas, de forma cônica;
- Exsudação de gel sílico-alcalino.

De qualquer modo a reação álcalis-sílica reativa é muito lenta e muitas vezes as consequências apenas se manifestam ao fim de muitos anos (Neville, 1995).

### **Reações álcalis-silicatos**

Alguns especialistas associam este tipo de reações essencialmente à reação entre iões de alcalinos da solução intersticial e certos minerais inter-estratificados com os filosilicatos, o que é corrente ocorrer em rochas como grauvaques, filitos ou argilitos onde a remoção daqueles minerais provoca uma exfoliação do filosilicato que pode expandir por absorção da água.

Esta reação álcalis-silicato é mais lenta que a álcalis-sílica, podendo coexistir os dois tipos de reação no betão, já que é normal nas rochas contendo filosilicatos existe quartzo microcristalino ou tectonizado. Pelas relações intrínsecas entre as reações álcalis-sílica e álcalis-silicato, estes dois tipos de reação são frequentemente englobados num mesmo termo de reações álcalis-sílica (Reis et al, 1997).

### **Reações álcalis-carbonatos**

A reatividade dos carbonatos envolve rochas com carbonatos numa série complexa de reações cuja natureza depende dos agregados, do cimento e do microclima. Tal como nas reações anteriores, os álcalis libertados da pasta de cimento ou de outras fontes reagem com agregados com carbonatos. Um aspeto típico destas reações é a formação de zonas de reação com até 2 mm de largura em torno das partículas de agregado (Coutinho e

Gonçalves, 1994).

A fendilhação desenvolve-se extensivamente no seio destes anéis tanto paralelos à interface como numa direção radial. As fendas radiais estendem-se lentamente, juntando-se a outras fendas na pasta. O desenvolvimento de uma rede de fendas, a perda de adesão entre o agregado e a pasta, conduz, eventualmente, à deterioração do betão (Reis e Silva, 1999).

### **2.2.6. Ataque de água pura**

A água subterrânea, de lagos e de rios contém contaminações como cloretos, sulfatos e bicarbonatos de cálcio e magnésio. Denominada de água dura (uma água que contém mais de 500 mg de sais calcários por litro), geralmente não ataca os constituintes da pasta de cimento Portland.

A água pura, da condensação de neblina ou vapor, e água mole da chuva, podem conter pouco ou nenhum ião de cálcio (pobre ou sem minerais, mas que pode conter compostos químicos reativos, inclusive ácidos).

A água pura decompõe determinados compostos de cimento através da dissolução do hidróxido de cálcio e, até determinado ponto, os compostos de alumina. A lixiviação (dissolução de compostos sólidos do betão) contínua apenas deixa um resíduo amorfo de sílica hidratada, óxido de ferro e alumina. Este tipo de ataque é geralmente muito lento, a não ser que a água possa atravessar continuamente a massa de betão (Coutinho e Gonçalves, 1994).

Quando estas águas entram em contacto com a pasta de cimento Portland, elas tendem a hidrolisar ou dissolver os produtos contendo cálcio.

O hidróxido de cálcio é o constituinte que, devido à sua solubilidade alta em água pura, é mais sensível à eletrólise, ocorrendo a lixiviação. Além da perda de resistência, a lixiviação do hidróxido de cálcio pode ser indesejável por razões estéticas. Frequentemente, o produto da lixiviação interage com o CO<sub>2</sub>, presente no ar, e resulta na precipitação de crostas brancas de carbonato de cálcio na superfície, fenómeno conhecido como eflorescência (Mehta et al, 1994).

### 2.2.7. Ataque da água do mar

A água do mar contém sulfatos e ataca o betão. Além da ação química, a cristalização dos sais nos poros do betão pode provocar a degradação devido à pressão exercida pelos cristais salinos, nos locais onde há evaporação, acima da linha de água. O ataque só ocorre quando a água pode penetrar no betão, portanto, o nível de impermeabilização é muito importante neste processo.



**Figura 18.** Estruturas de betão localizadas na linha da maré severamente deterioradas (Aguiar, 2006)

Os betões localizados entre os limites da maré, sujeitos à molhagem e secagem alternadas (o que facilita a cristalização dos sais), são severamente atacados, conforme Figura 18, enquanto os betões submersos permanentemente, são menos atacados.

A ação do mar sobre os betões é acompanhada das ações destrutivas de impactos e abrasão das ondas, principalmente nas estruturas “*off-shore*”.

A ação dos sulfatos na água do mar não provoca a expansão do betão, diferentemente das águas subterrâneas. A ausência de expansão é devida à presença de cloretos na água do mar, que inibem a expansão, porque o gesso e o sulfo-aluminato de cálcio são mais solúveis em soluções de cloretos do que em água e são, portanto, lixiviados pela água do mar.

No betão armado a absorção de sal cria regiões anódicas e catódicas, resultando em uma ação eletrolítica que leva à corrosão das armaduras, de modo que, os efeitos da água do mar são mais sérios no betão armado de que no betão simples. É preciso dotar as armaduras de cobertura suficiente e utilizar betão denso e impermeável (Nepomuceno, 1982).

### **2.2.8. Ataque por ácidos**

O ataque ácido resulta de uma reação entre a solução atacante e os compostos do cimento, conduzindo à formação de compostos secundários que são lixiviados do betão, ou permanecem numa forma não aderente ao betão, resultando na perda do gradual da resistência (Gutt, 1977 citado por Mailvaganam, 1991). Normalmente o hidróxido de cálcio é alvo de um ataque vigoroso, apesar de todos os compostos do cimento Portland serem suscetíveis à degradação.

As soluções ácidas minerais (e.g., sulfúrico, hidrocloreto nítrico e fosfórico) e orgânicas (lático, acético, fórmico, tânico, propiônico entre outros) são as mais agressivas para o betão. Dependendo do tipo de ácido, o ataque poderá ser unicamente ácido, ou então, seguido de um ataque de sal (Ferreira, 2000).

Em ambientes húmidos, o  $\text{CO}_2$ , o  $\text{SO}_2$  e outros gases ácidos presentes na atmosfera atacam o betão, dissolvendo e removendo parte da pasta de cimento Portland endurecido, que não é resistente aos ácidos.

O ataque ocorre em valores de pH próximos de 6.5. Para pH entre 3 e 6 a velocidade do ataque é proporcional à raiz quadrada do tempo, sendo determinante a difusão através dos produtos pouco solúveis que permanecem, depois que o  $\text{Ca(OH)}_2$  foi dissolvido. A velocidade de ataque depende não só do pH, mas também da capacidade dos iões serem transportados.

Os betões também são atacados por águas contendo  $\text{CO}_2$  livre (como em terrenos pantanosos, dada a decomposição de matéria orgânica), com pH em torno de 4.4, e pelas águas puras com pouco  $\text{CO}_2$ .

Os tubos de esgotos sofrem deteriorações acentuadas quando os compostos de enxofre são

transformados em  $H_2S$  por bactérias anaeróbicas. Este agente, mesmo não sendo agressivo, sofre oxidação pelas bactérias aeróbicas, dando como produto final o ácido sulfúrico, sendo que o ataque se processa acima do nível do líquido. O cimento se dissolve gradativamente e degrada o betão.

O ataque de um ácido orgânico no betão produz uma massa sem coesão em que o cimento é dissolvido e possui muito pouca resistência. Existe um grande número de ácidos orgânicos, que entram em contacto com o betão exercendo um efeito nocivo sobre ele. Estes ácidos podem ser divididos em dois grupos, como se ilustra na Tabela 5.

<b>Tabela 5. Ácidos e outras substâncias que provocam o ataque químico do betão (adaptado de Neville, 1995)</b>	
Ácidos	
Inorgânicos	Orgânicos
Carbónico	Acético
Hidroclórico	Cítrico
Hidrofluórico	Fórmico
Nítrico	Húmico
Fosfórico	Lático
Sulfúrico	Tânico
Outras substâncias	
Cloretos de alumínio	Gorduras animais e vegetais
Sais de amoníaco	Óleos vegetais
Sulfuretos de hidrogénio	Sulfatos

Vários ensaios físicos e químicos de resistência aos ácidos foram desenvolvidos, mas não existem procedimentos padronizados. O pH isoladamente não é um indicador adequado do potencial do ataque, dado que fatores como (i) a presença de  $CO_2$ , (ii) a dureza da água, (iii) temperatura e (iv) pressão aumentam a intensidade do ataque.

O uso de cimento de alto-forno e de pozolanas ajuda o desempenho do betão, mas ele depende mais das suas próprias qualidades do que do tipo de cimento usado.

A resistência ao ataque químico aumenta quando a superfície está seca antes de ser exposta. Também, a película de carbonato de cálcio, formada pela ação do  $\text{CO}_2$  sobre a cal, obstrui os poros e aumenta a permeabilidade da camada superficial. Portanto, os betões pré-fabricados tendem a ser mais resistentes que os moldados “*in situ*”.

As superfícies de betão sujeitas aos ataques químicos devem ser protegidas com pinturas de borracha, resinas epóxicas e outras barreiras. O nível de proteção é bastante variável, mas é essencial que a barreira antiácida seja bem aderente ao betão e resistente às ações mecânicas (Nepomuceno,1982). A Figura 19 mostra um pilar deteriorado por falta de proteção.



**Figura 19.** Ataque químico por ácido sulfúrico deteriorou pilar numa indústria de fertilizantes (Aguiar, 2006)

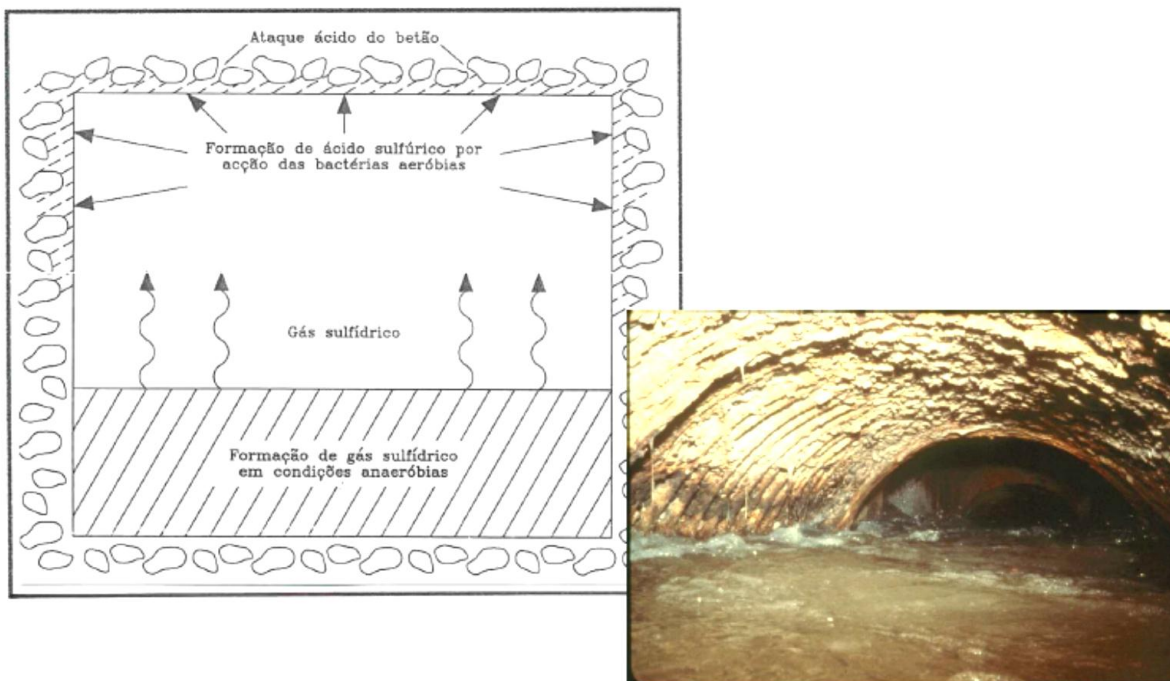
### **2.3. Processos biológicos**

O fenómeno mais importante a considerar é a ação das bactérias nos esgotos devido à presença do enxofre, que é transformado em ácido (sulfídrico, sulfúrico) ou em sulfatos, por causa da presença de micro-organismos. Há ainda a ação vegetal (raízes e fungos) e a ação animal (dejetos de aves, por exemplo).

O tipo principal de ataque biológico de corrosão de betão das estruturas deve-se ao contato deste com águas residuais, resultado da atividade metabólica de várias espécies de bactérias e fungos (Figura 20). A maior parte destes microrganismos existentes nos esgotos, tendem a oxidar o enxofre e os compostos contendo enxofre para ácido sulfúrico ( $H_2S$ ) (Swab, 1961).

Sob condições anaeróbicas, i.e., para níveis muito baixos de oxigénio, os compostos de enxofre nos esgotos são reduzidos pela ação bactéria em sulfetos, que escapam para a atmosfera como  $H_2S$ .  $OH_2S$  (em gás) dissolvem-se na humidade condensada acima do nível da água das condutas, nas paredes das câmaras de visita e fossas.

Sob condições aeróbicas, i.e., elevado nível de oxigénio, o  $H_2S$  dissolvido é convertido pela bactéria capaz de oxidar enxofre em ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ). Este ácido, altamente agressivo para o betão, pode ser absorvido para o interior do betão, resultando na rápida degradação das infraestruturas de saneamento.



**Figura 20. Deterioração por ataque químico em esgotos (Costa, 2011)**

Algumas das condições químicas e físicas que contribuem para o ataque bacteriológico são Barnard (1967):

- A temperatura adequada dos esgotos para atividade bacteriológica (35 a 39 °C);
- A presença de enxofre no esgoto e resíduos industriais;
- O sistema onde as águas residuais ficam retidas em condições estagnantes de escoamento;
- A falta de ventilação.

Como resultado dos ataques, as superfícies onde se depositam as bactérias são escorregadias. Tais ataques são comuns em indústrias como o óleo, gás, polpa e papel, a indústria química e muitos sistemas de armazenamento e distribuição de água (Silva e Deloye, 1991 citado por Neville e Brooks, 1997).

## **2.4. Considerações finais**

Em suma, neste capítulo foi apresentado um conjunto alargado de problemas a que poderá estar sujeito o betão, como se sintetizou na Tabela 2. De facto, nesta tabela são apresentados os principais fatores de degradação, com os processos respetivos que causam problemas ao betão. Os sintomas e meios atualmente disponíveis para diagnóstico destes problemas serão abordados no capítulo seguinte.

### 3. Sintomas e meios de diagnóstico dos principais problemas em betão

#### 3.1. Introdução

O processo de levantamento de problemas e anomalias em estruturas de betão consiste no registo das origens, sintomas e natureza dos problemas por eles apresentados, no seu estado atual.

A resolução dos problemas em betão inicia-se com a fase de diagnóstico, que engloba as seguintes fases:

- Identificação dos sintomas;
- Recolha de informação e exame detalhado da situação;
- Restabelecimento do diagnóstico das causas;
- Definição da solução e atuação corretiva.

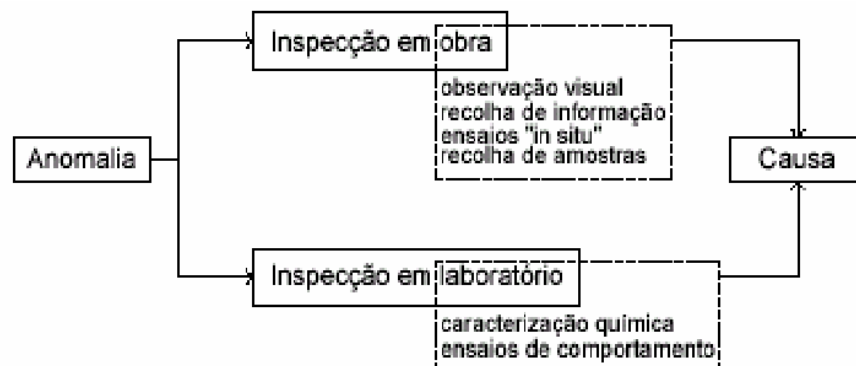


Figura 21. Fluxograma do diagnóstico de intervenção (Jâcome e Guerra Martins, 2005)

As anomalias detetadas são assinaladas esquematicamente sobre peças desenhadas – plantas, alçados e cortes – que sejam necessárias para evidenciar a sua importância e disposição no edifício ou na estrutura. Obviamente, a frequência dos ensaios prevista num plano de inspeção aumenta com a idade da estrutura.

### 3.2. Sintomas

Sempre que possível, são utilizados termos que definam corretamente os problemas e as anomalias detetadas, que se identificam nos seguintes sintomas:

- Microfissuração no betão;
- Perda de aderência da argamassa (nomeadamente junto à superfície dos agregados);
- Presença de gel exsudado ou nos vazios do betão;
- Fissuração localizada com orientação preferencial;
- Fissuração generalizada sem orientação preferencial;
- Movimentação (abertura ou deslocamento relativo) de juntas de dilatação;
- Assentamentos diferenciais da construção;
- Deformações de paredes ou pavimentos;
- Manchas de humidade;
- Desagregação ou destacamento dos materiais de revestimento;
- Eflorescências ou cripto-fluorescências;
- Presença de bolores ou fungos,
- Outros.

Nalguns dos casos onde forem detetadas fissuras, poder-se-á medir a sua abertura através de uma régua de fissuras e registá-la para posterior comparação, caso venha a ser necessário.

Todos os sintomas detetados serão assinalados em peças desenhadas a uma escala apropriada, devendo-se ter em conta as seguintes características da representação do levantamento:

- Deformações excessivas de pavimentos, escadas e coberturas ou de outros elementos da construção, com indicação das cotas altimétricas das deformadas, em

relação à cota de soleira da construção;

- Empenos de paredes ou de elementos estruturais verticais;
- Fissuração das paredes de alvenaria ou de elementos estruturais, definida pela disposição das fissuras e pela respetiva abertura, de modo a evidenciar a sua importância;
- Presença de manchas de humidade e eflorescências, com indicação da sua extensão e respetiva indicação qualitativa superficial;
- Zonas com delaminação e/ou destaque do betão devido à corrosão de armaduras, com indicação da sua grandeza.

O registo dos sintomas detetados é tratado informaticamente, em suporte CAD e com digitalização de imagem, permitindo assim a sua mais fácil manipulação posterior.

### **3.3. Meios de diagnóstico**

#### **3.3.1. Introdução**

Estão atualmente disponíveis diversos tipos de equipamentos, que deverão ser selecionados consoante o rigor pretendido no levantamento, nos mais simples se destacam, entre outros:

- Equipamento topográfico, se necessário;
- Fita métrica;
- Comparador de fissuras;
- Humidímetro;
- Martelo de geólogo;
- Boroscópio;
- Carotagem (nomeadamente de pequeno diâmetro);
- Câmara fotográfica e escala decimétrica.

Em complemento, os métodos de ensaios não destrutivos (Non Destructive Testing, NDT)

são também cada vez mais utilizados, sobretudo porque estes métodos não afetam a aparência nem o desempenho da estrutura que está a ser analisada e, assim, permitem a repetição do mesmo ensaio no mesmo local ou muito próximo, de forma a possibilitar uma constante e permanente monitorização das estruturas e o acompanhamento das suas variações ao longo do tempo.

Através desta monitorização, é possível prolongar a vida útil das estruturas monitorizadas, tornando mais fácil e económico o seu tratamento e recuperação, bem como verificar a efetividade da intervenção efetuada.

É de salientar que os NDT não são métodos adequados para medir a resistência de uma estrutura, mas servem para analisar as suas propriedades e determinar a sua homogeneidade.

Como exemplo, a relação entre a velocidade de propagação da onda ultrassónica e a resistência à compressão do betão não é muito fiável, pois o número de variáveis que afetam a resistência do material é grande, incluindo, por exemplo, a relação água-cimento, o tamanho e tipo do agregado, o procedimento de moldagem, o tamanho da amostra e o tipo de cimento. No entanto, podem-se estabelecer estimativas da resistência a partir de alguns dos resultados obtidos. De facto, quanto mais homogêneo for o betão e quanto menor for a relação água/cimento do mesmo, mais resistente será o betão.

De entre os métodos de NDT disponíveis, o ensaio ultrassónico pode ser considerado um dos mais promissores na avaliação de estruturas de betão, pois possibilita realizar um exame da homogeneidade do material. Os ensaios ultrassónicos servem para caracterizar um determinado material, sua integridade e outras propriedades físicas, tornando-se uma técnica bastante usada para o controle de qualidade, deteção de defeitos, medição de espessuras ou caracterização dos materiais constituintes do betão (ASTM, 1995).

Através da sua utilização consegue-se realizar um controle total da estrutura, podendo-se levar em conta, inclusive, as variações das propriedades com o tempo. Para além disso, é possível, através da análise das variações na velocidade de propagação de uma onda ultrassónica, verificar a compacidade de uma estrutura ou detetar regiões heterogêneas no

interior da mesma. Assim, o ensaio ultrassónico é um indicativo útil e pode ser aplicado com segurança para avaliar a homogeneidade do betão numa estrutura (Landis et al, 2002).

Todos estes trabalhos deverão ser realizados por pessoal qualificado (técnicos de ensaios), utilizando equipamentos calibrados ou devidamente testados, sendo a coordenação assegurada (inclusivamente no local) por um Engenheiro Civil, com experiência na reabilitação de estruturas, em particular na área do diagnóstico.

Por norma, é realizado um levantamento fotográfico colorido dos elementos de pormenor mais representativos do estado de conservação do edifício ou estrutura, devendo as fotografias possuir escala decimétrica (fotografada em conjunto com o elemento representado).

Deverá ser elaborado um relatório, descrevendo os trabalhos realizados e apresentando os resultados obtidos e as conclusões. Se necessário, poderá incluir a definição da estratégia de reabilitação possível.

Assim, as patologias identificadas no capítulo anterior podem ser identificadas, quantificadas e registadas através de diversos meios e métodos de diagnóstico, como se detalhará a seguir, em termos do tipo de problema. Em função das patologias encontradas, o grau de intensidade e nível de degradação da estrutura, poderão ser realizados diversos ensaios no local.

### **3.3.2. Localização das barras de aço e espessuras de cobrimento**

A utilização de ensaios não destrutivos, de acordo com um plano de inspeção a elaborar em função das características iniciais da estrutura, bem como com as do meio ambiente em que esta se insere, permite determinar o estado do betão da camada de recobrimento. Utilizando um equipamento do tipo “PROFOMETER” (Rebar Locator) é executado um rastreamento na superfície do betão para se determinar/confirmar as dimensões das amaduras utilizadas, sua distribuição e espessura de cobrimento do betão (ensaio não destrutivo).

Esta aparelhagem (Figura 22), de elevada precisão, irá determinar a real espessura de cobrimento do betão que protege a armadura.



Figura 22. Ensaio de medição da espessura de recobrimento (Aguiar, 2006)

### 3.3.3. Determinação da resistência a compressão

A avaliação da resistência a compressão do betão poderá ser feita por ensaio não destrutivo utilizando o esclerómetro pendular, ou através da retirada de corpos de prova para rompimento em laboratório (ensaio destrutivo, eu pode ser minimizado pela remoção de provetes de dimensão abaixo do estandardizado, 15cm).

Estes métodos são os mais utilizados na verificação da resistência em betão endurecido.

### 3.3.4. Determinação da densidade e homogeneidade do betão

Utilizando o ensaio de ultrassons, através de um aparelho do tipo PUNDIT (*Portable Ultrasonic Non Destructive Digital Indicating Test*) são determinadas características importantes do betão. A velocidade de propagação de impulsos ultrassónicos no interior do betão permite determinar as características de densidade e propriedades elásticas do material.

Conforme explica Lorenzi et al. (2003), as ondas são transmitidas pelo transdutor emissor, que consiste em um cristal piezoelétrico capaz de converter a energia elétrica em onda mecânica (sonora). Quando esse transdutor está em contato com o material a ser analisado, emite uma onda que atravessa o mesmo. Ao encontrar uma descontinuidade esta onda é refletida, retardando o sinal que é captado pelo recetor, como explica Finch (1985). Quanto maior a velocidade de onda, maior será a densidade do betão.

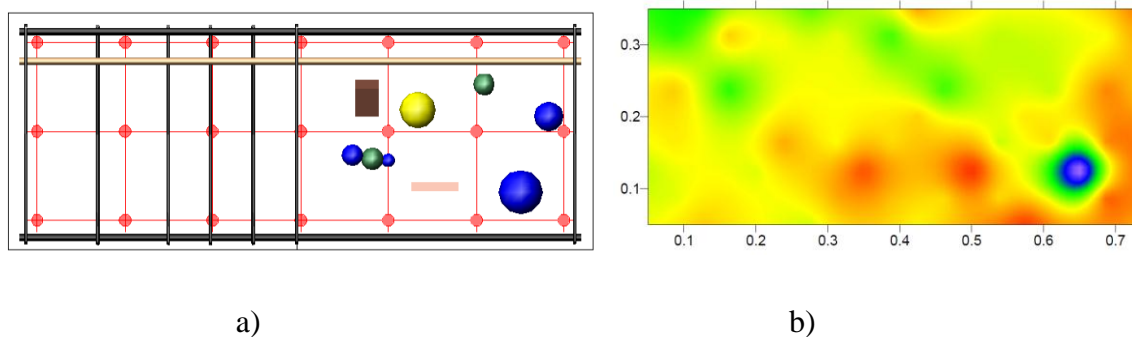
Os ensaios podem ser realizados de forma indireta, quando se tem acesso a apenas uma das

faces. Mas, para uma melhor resposta, os transdutores devem preferencialmente ser colocados em faces opostas, pois se torna menos provável que ocorra a perda ou perturbação do sinal. A medição desta velocidade (Figura 23) mostra a homogeneidade do betão, a presença de vazios, fissuras e outras imperfeições, além de permitir determinar a densidade e resistência do betão.



**Figura 23. Determinação da densidade e homogeneidade do betão (Aguiar, 2006)**

A título de exemplo, mostra-se na Figura 24 um estudo de Lorenzi et al. (2003), onde foram propositadamente colocados vários objetos (bolas de diferentes dimensões e materiais, incluindo esferovite e plástico e pedaços de madeira) no interior do betão para criar heterogeneidade.



**Figura 24. Avaliação da homogeneidade de uma viga de betão: a) esquema da viga de ensaios com objetos estranhos ao betão no seu interior; b) resultados da análise dos ensaios ultrassónicos (Lorenzi et al. 2003)**

A análise das medições através das ondas ultrassónicas (Figura 24b) permitiu gerar uma

superfície de curvas de nível, com base nos dados obtidos através dos ultrassons. Observando a imagem gerada pode-se verificar a existência de regiões onde as leituras são mais baixas ou mais altas, indicando variações na homogeneidade do betão, que podem ser associadas à presença de defeitos, neste caso intencionais. Na Figura 24b é evidente a região onde foi colocada a bola de esferovite de maior dimensão. Toda a região direita da figura, onde estão os objetos inseridos, mostra variações nas leituras, permitindo estimar aproximadamente sua posição.

### **3.3.5. Permeabilidade e porosidade do betão**

O conhecimento dos mecanismos de transporte de líquidos e gases nos poros do betão é determinado pelo ensaio de permeabilidade à água sob pressão, ensaio “in situ” utilizando o permeabilímetro. Poderá também ser realizado este estudo em laboratório, utilizando corpos de prova extraídos da estrutura.

Um método muito simples de avaliação da porosidade do betão e argamassas é a leitura facilidade da subida da humidade ascensional num provete deste material, da qual pode ser extrapolada a sua própria permeabilidade.

### **3.3.6. Medida da profundidade de carbonatação**

Uma das principais patologias a detetar, e que não é perceptível apenas por inspeção visual, é a carbonatação do betão. Para tal utiliza-se uma solução de fenolftaleína (Figura 25), a qual é projetada sobre a superfície do betão, a qual deve estar convenientemente limpa. Caso seja detetada carbonatação na camada superficial, o ensaio prossegue em profundidade para determinar a espessura afetada.

Assim, através da retirada de corpos de prova será determinado a profundidade de carbonatação. A medição será realizada utilizando um indicador de PH, com aspersion de fenolftaleína na superfície do provete.

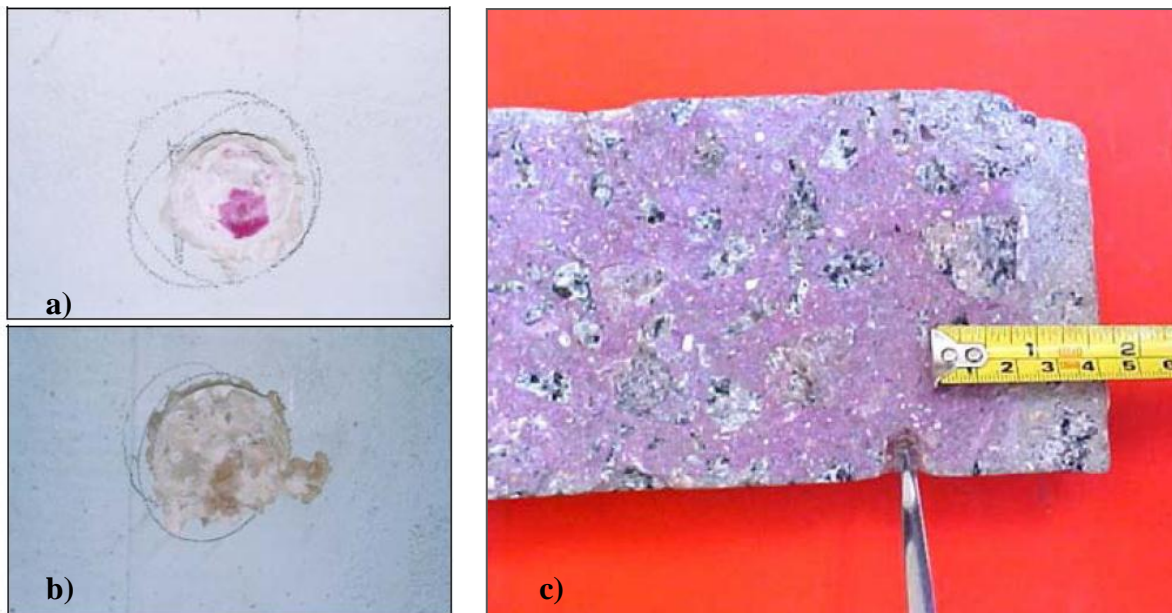
#### **b) Método analítico da determinação da profundidade da carbonatação**

Sob condições de humidade constantes, o aumento da profundidade de carbonatação é

proporcional à raiz quadrada do tempo, sendo uma característica da absorção capilar e não da difusão. Assim, é possível exprimir a profundidade da carbonatação,  $c$ , como sendo (Ferreira, 2000):

$$c = k \cdot \sqrt{t} \quad (2)$$

Em que  $c$  é a profundidade de carbonatação,  $k$  é o coeficiente de carbonatação e  $t$  corresponde ao tempo em anos. Os valores de  $k$  dependem de vários fatores, entre os quais se destacam a humidade e a permeabilidade do betão. Os valores do coeficiente de carbonatação são normalmente superiores a 3 ou 4 mm /  $\sqrt{\text{ano}}$  para betões de baixa resistência. A expressão, que recorre à raiz quadrada do tempo, não é aplicável quando as condições de exposição não são constantes (Neville, 1995).



**Figura 25. Medição da profundidade de carbonatação através do teste com fenolftaleína: a) betão não carbonatado; b) betão carbonatado (Mendonça, 2005); c) teste indicando uma profundidade de carbonatação de 2cm numa amostra com 4cm de cobrimento de armadura (Aguiar, 2006)**

### c) Métodos experimentais de determinação da profundidade de carbonatação

Existem diversos métodos laboratoriais para a determinação da profundidade de

carbonatação, a análise química, difração por raios X, espectrografia por infravermelhos e análise termogravimétrica. Existe um método mais expedito para determinação da profundidade de carbonatação, que consiste na utilização de uma solução de fenolftalaína diluída como indicador de alcalinidade.

Este método consiste na utilização de um indicador de fenolftalaína, que em ambientes alcalinos adquire a cor rosa-carmim. O teste pode ser realizado, aplicando a solução em fendas abertas propositadamente para o efeito, ou em laboratório, utilizando provetes recolhidos do local a testar.

Após a aplicação do indicador, pode observar-se o aparecimento de zonas com cor rosa-carmim, que mostram a frente de carbonatação e conseqüentemente a profundidade de carbonatação. Quando a profundidade de carbonatação for igual à espessura do recobrimento do betão, a camada passiva de proteção é destruída e dá-se início à corrosão das armaduras. Este método possui algumas limitações, pois podem existir zonas parcialmente carbonadas que não serão detetadas pela solução de fenolftalaína. Ou seja, podem existir reações de dióxido de carbono a profundidades superiores à indicada por este teste.

### **3.3.7. Análise de penetração de cloretos, sulfatos e agentes químicos**

Existem vários tipos de incertezas na determinação da quantidade de cloreto no betão. As principais causas são (Ferreira, 2000):

- Condições de exposição, tanto nos ensaios *in situ* como em laboratório;
- Erros na preparação das amostras, tanto nos ensaios *in situ* como em laboratório;
- Os testes escolhidos podem não ser os mais adequados, tanto nos ensaios *in situ* como em laboratório;
- A interpretação dos resultados, quando por exemplo uma amostra é rejeitada.

A influência das condições de exposição nos ensaios *in situ* tem um papel muito importante na penetração dos cloretos no betão.

Como já foi referenciado em cima, geralmente as fachadas localizadas a barlavento contêm mais cloretos do que as fachadas a sotavento, pois estas estão mais protegidas das chuvas que acabam por ajudar na limpeza dos cloretos que se encontram na face do betão.

As condições de exposição são também reguladas pela altura em relação ao nível médio das águas do mar e pelas distâncias às praias. Não existem atualmente recomendações no que diz respeito à recolha de amostras para análise de cloretos no betão, no entanto, devem ser tidos em conta os fatores acima mencionados.

O teor em cloretos pode também ser determinado através de ensaios não destrutivos.

#### **a) Medição do conteúdo de sulfatos e cloretos**

A medição de cloretos é feita em amostras de pó retiradas do betão, em diferentes profundidades da estrutura, e a análise quantitativa é feita por via química ou por análise de fluorescência de raios-X (Figueiredo, 2005).

São retiradas amostras de pó, através de furadeiras elétricas, em profundidade pré-determinadas. Estas amostras são devidamente ensacadas e enviadas a laboratório para serem quantificadas através de ensaios específicos. Para agilizar os resultados no campo poderão ser utilizados “kits” específicos, disponíveis no mercado, que fornecem em forma digital a quantidade de “ppm” de cloretos e a percentagem de cloretos por peso de amostra.

### **3.3.8. Estudo da corrosão das armaduras**

Através de ensaios utilizando técnicas eletroquímicas poderão ser realizados diversos estudos a respeito da evolução dos processos corrosivos do betão. São utilizados equipamentos especiais, de última geração, que combinando os resultados fornecem elementos precisos sobre a evolução do nível de corrosão eletroquímica presentes na armadura de betão.

A medida do potencial de corrosão baseia-se em determinar a diferença de potencial entre o aço da armadura e um eléctrodo de referência em contato com a superfície do betão. A medição em diversos pontos da armadura identifica as áreas com altos gradientes e

consequentemente com forte risco de corrosão. É utilizado um equipamento como o “Canin – Corrosion Analysing Instrument”, que irá traçar um mapa de equipotenciais, permitindo identificar as possíveis áreas de corrosão.

### 3.3.9. Resistividade do betão

A resistividade do betão é um parâmetro que está relacionado com a velocidade de propagação do processo corrosivo. A corrosão do aço é um processo eletroquímico com a presença de uma corrente elétrica no interior do betão, que funciona como eletrólito. Uma vez iniciada a corrosão, a velocidade de propagação depende das características do meio. Quanto mais resistivos forem os componentes do betão, menor será a velocidade da corrosão da armadura. Esta resistividade é medida através de equipamentos específicos, do tipo “Resistivity Meter”, como mostra a Figura 26, em ensaios não destrutivos.

Atualmente existe instrumentação, tecnologicamente avançada, que permite detetar a corrosão das armaduras sem destruição local do betão, tal como aparelhos de ultrassons ou de medição de resistividade.



Figura 26. Medidor de resistividade do betão (Mendonça, 2005)

### 3.3.10. Diagnóstico da reação álcalis-agregado

Segundo Kuperman (2005), a única evidência inquestionável de que uma estrutura está afetada pela reação álcalis-agregado (com exceção da reação álcalis-carbonato) é a presença do gel resultante, ou seja, a presença de uma “borda de reação”, constituída pelo gel em torno do agregado, o qual na maior parte das vezes não é visível a olho nu. Assim, a

ocorrência de reação pode não ser detetada durante anos, até ao aparecimento de fissuras.

Segundo Hasparyk (1999), a instrumentação poderá envolver a instalação de marcos topográficos para medição de deslocamentos das estruturas, medidores de distâncias relativas de alta precisão (pinos de convergência e divergência) para monitorização de deslocamentos com correções de temperatura, medidores tri-ortogonais para medição dos deslocamentos de juntas e extensómetros de hastes para medição de deformações no interior das estruturas.

## 4. Soluções interventivas nos principais problemas em betão e argamassas hidráulicas

### 4.1. Durabilidade, vida útil e necessidade de intervenções

A durabilidade de betões e argamassas hidráulicas tem interesse direto na salvaguarda da vida útil prevista para edifícios e outras construções, desde fundações e estruturas até aos revestimentos hidráulicos.

Conforme a Figura 27, a intervenção reparadora de uma edificação garante o prolongamento da sua vida global por um período que, embora residual, pode ser económica e funcionalmente interessante (CEB, 1992; Andrade e Alonso, 1996).

#### desempenho

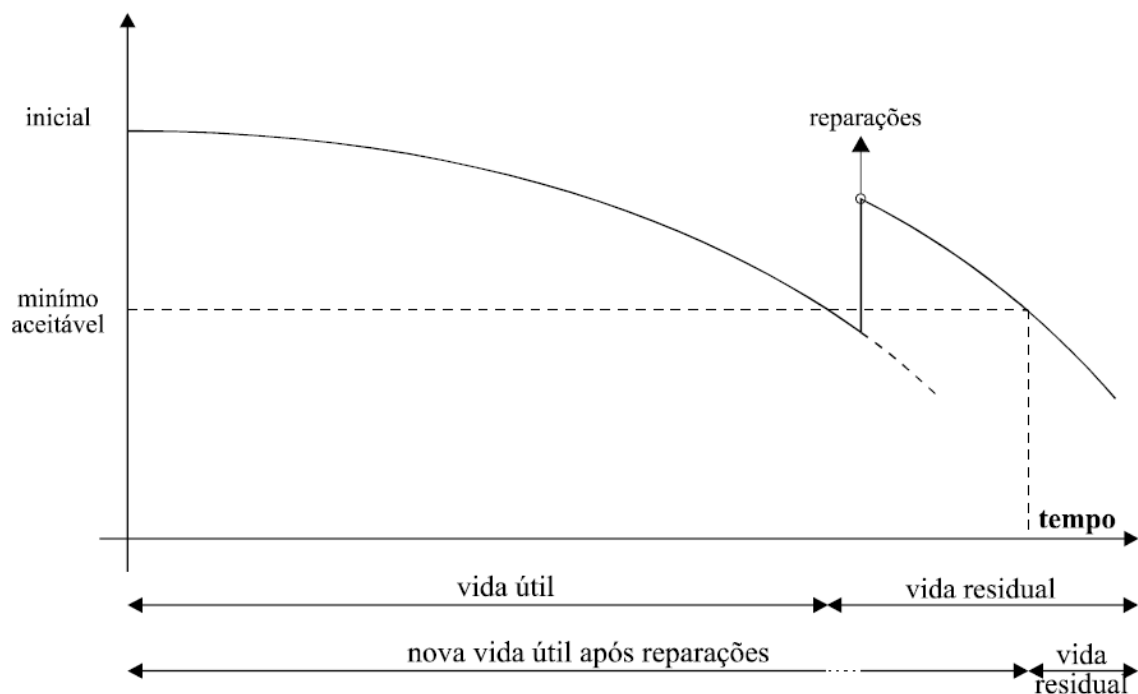


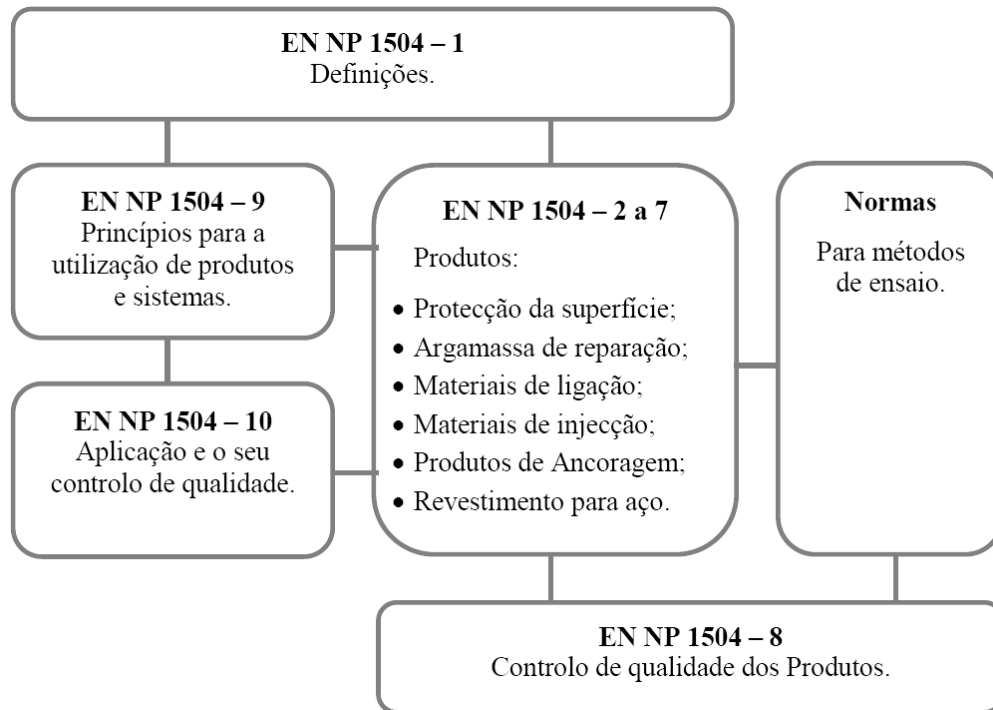
Figura 27. Vida útil e vida residual (CEB, 1992; Andrade e Alonso, 1996)

Nesse sentido, interessa estudar a normalização neste importante setor da reparação e

reabilitação construtiva, seja programada ou extraordinária.

#### 4.2. A normalização sobre reparação de betões (EN 1504) e sua aplicabilidade

A norma europeia EN 1504 “Proteção e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão” define e sugere um conjunto alargado de soluções interventivas nos principais problemas que podem ocorrer em betão. Esta norma encontra-se dividida em dez partes, que se interligam conforme se esquematiza na Figura 28. Atendendo à provável presença do mesmo ligante (cimento) e do esqueleto pétreo nas argamassas hidráulicas, comete-se o atrevimento de estender as recomendações desta norma às mesmas, armadas ou não.



**Figura 28.** A norma EN 1504 e as ligações entre as suas diferentes partes (Sousa, 2011)

A norma EN 1504 (CEN, 2004, IPQ, 2009) prevê vários sistemas de proteção superficial que podem funcionar como medida preventiva ou como um modo de reduzir os processos de degradação já iniciados. Assim, de acordo com a norma, existem vários produtos e processos para os diferentes tipos de betão e de exposição ambiental.

De acordo com a referida norma, ao escolher a ação apropriada para satisfazer os requisitos

futuros relativos à vida útil da estrutura, devem ser tomadas em consideração as seguintes opções de gestão da estrutura (EN 1504-9, IPQ, 2009):

- a) Não fazer nada, mas monitorizar;
- b) Reanalisar a capacidade da estrutura, podendo conduzir a uma alteração de funcionamento;
- c) Prevenir ou reduzir outras deteriorações;
- d) Reforçar ou reparar e proteger toda ou parte da estrutura de betão;
- e) Reconstruir ou substituir toda ou parte da estrutura de betão;
- f) Demolir toda ou parte da estrutura de betão.

Relativamente aos fatores a considerar para a escolha da estratégia de gestão e dos produtos a utilizar, a norma refere, de forma não exclusiva, os seguintes (EN 1504-9, IPQ, 2009):

- a) Fatores de base:
  - 1. A utilização pretendida e a vida útil de serviço remanescente;
  - 2. O desempenho requerido da estrutura (esta poderá incluir, por exemplo, a resistência ao fogo e a estanquidade).
  - 3. A provável vida útil de serviço dos trabalhos de proteção e reparação;
  - 4. A disponibilidade requerida da estrutura, a interrupção admissível da sua utilização e as oportunidades para trabalhos adicionais de proteção, reparação e monitorização;
  - 5. O número e custo dos ciclos de reparação aceitáveis durante a vida útil de projeto da estrutura de betão;
  - 6. O custo de estratégias de gestão alternativas, incluindo inspeções e manutenções posteriores ou outros ciclos de reparação;
  - 7. Propriedades e possíveis métodos de preparação do substrato existente;
  - 8. A aparência da estrutura protegida e reparada.
- b) Fatores estruturais:

1. Ações durante e após a execução da estratégia;
  2. Ações e como estas serão resistidas.
- c) Fatores ligados à saúde e à segurança:
1. Consequências duma rotura estrutural;
  2. Requisitos respeitantes à saúde e à segurança;
  3. Efeito sobre os ocupantes ou utilizadores da estrutura e sobre terceiras partes.
- d) Fatores ambientais:
1. A exposição ambiental da estrutura e se ela pode ser modificada localmente (a verificar de acordo com a EN 206-1) ;
  2. A necessidade ou oportunidade de proteger parte ou toda a estrutura de betão das intempéries, poluição, nevoeiro salino, etc., incluindo a proteção da estrutura durante os trabalhos de reparação.

Durante a intervenção, a escolha de métodos de proteção e reparação para estruturas de betão deve respeitar os seguintes requisitos, constantes na norma 1504 (CEN, 2004, IPQ, 2009):

- a) Ser apropriada para o tipo, causa ou combinação de causas e extensão de defeitos;
- b) Ser apropriada para as condições de serviço futuras;
- c) Ser apropriada para a opção de proteção e reparação para a qual for escolhida;
- d) Cumprir os princípios presentes na parte 9 da presente norma;
- e) Recorrer à utilização de sistemas e produtos que estejam de acordo com as especificações da norma EN1504 (IPQ, 2006, 2009) ou qualquer outra norma relevante.

Os princípios de proteção e reparação de betão baseiam-se em leis químicas e físicas que permitem a prevenção ou estabilização dos processos de deterioração química e física no betão, bem como na superfície do aço das armaduras. Os princípios contidos na norma EN 1504 (CEN, 2004) dividem-se em 2 grupos: (i) problemas no betão e (ii) problemas de

corrosão de armaduras.

No âmbito desta dissertação serão apresentados em maior detalhe os problemas diretamente associados ao betão. Deste modo, os princípios referentes a anomalias no betão são os seguintes:

- Princípio 1 – Proteção contra o ingresso/penetração, ou seja, redução do ou proteção contra o ingresso de agentes desfavoráveis (por exemplo: i) impregnação do betão (hidrofugantes); ii) revestimentos de superfície; iii) colmatação de fissuras; iv) aplicação de membranas);
- Princípio 2 – Controlo da humidade, ou seja, ajuste e manutenção da humidade contida no betão dentro de um certo intervalo de valores (por exemplo: i) impregnação do betão (hidrofugantes); ii) revestimentos de superfície; iii) colocação de coberturas; iv) tratamento eletroquímico);
- Princípio 3 – Reparação do betão, ou seja, reparação do betão de um elemento de uma estrutura de betão para a sua função e forma inicial ou substituição de uma parte da estrutura (por exemplo: i) aplicação manual de argamassa; ii) colocação de betão moldado; iii) projeção de betão/argamassa);
- Princípio 4 – Reforço estrutural, ou seja, aumento da capacidade de carga do elemento da estrutura de betão (por exemplo: i) colocação de armaduras ordinárias de reforço e projeção de betão; ii) aplicação de pré-esforço exterior; iii) colagem de fibras de carbono);
- Princípio 5 – Resistência física, ou seja, aumento da resistência aos ataques físicos e mecânicos (por exemplo: i) revestimentos de superfície; ii) aplicação de membranas);
- Princípio 6 – Resistência química, ou seja, aumento da resistência superficial do betão aos ataques químicos (por exemplo: i) revestimentos de superfície; ii) aplicação de membranas);

Quanto aos princípios a ter em conta para a reparação de estruturas degradadas devido à corrosão de armaduras, a norma indica os seguintes:

- Princípio 7 – Preservação ou restauro da passivação, ou seja, introdução de condições químicas para que a superfície de reforço seja mantida ou regresse a uma condição passiva (por exemplo: i) aumento do recobrimento das armaduras com argamassa cimentícia ou betão; ii) substituição do betão contaminado ou carbonatado (reparações localizadas); iii) realcalinização eletroquímica do betão carbonatado; iv) realcalinização do betão carbonatado por difusão; v) extração eletroquímica de cloretos);
- Princípio 8 – Aumento da resistividade (por exemplo: limite do teor de humidade no betão usando tratamentos de superfície);
- Princípio 9 – Controlo catódico, ou seja, criação de condições em que as potenciais áreas catódicas do reforço são impossibilitadas de conduzir uma reação anódica (por exemplo: limite do teor de oxigénio – no cátodo - por saturação ou por aplicação de revestimento de superfície);
- Princípio 10 – Proteção catódica (por exemplo: aplicação de potencial elétrico);
- Princípio 11 – Controlo das áreas anódicas, ou seja, criação de condições em que as potenciais áreas anódicas de reforço são impossibilitadas de participar na reação de corrosão (por exemplo: i) proteção das armaduras com revestimento com pigmentos ativos (proteção catódica); ii) proteção das armaduras com revestimentos barreira; iii) aplicar inibidores no betão; iv) substituição por armaduras mais resistentes à corrosão – em aço inox).

A parte 9 da norma EN 1504 (CEN, 2004) prevê também métodos de reparação e proteção de acordo com os princípios enumerados anteriormente, constituindo por esta razão um manual de importância considerável no processo de seleção do sistema de proteção/reparação de uma estrutura de betão. As etapas previstas na EN 1504-9 podem ser agrupadas de forma a resultarem em 5 fases distintas, como se esquematiza na Figura 29:

1. Assim, o processo de reabilitação inicia-se com a fase de diagnóstico, constituída por duas tarefas que visam avaliar o estado da estrutura e identificar os problemas ou patologias existentes;

2. Seguidamente, na fase deliberativa são decididas as medidas a tomar e os princípios e métodos a adotar para a resolução dos problemas;
3. Na terceira fase é feito o dimensionamento da solução adotada, baseada na decisão tomada anteriormente;
4. A penúltima fase consiste na execução dessa solução;
5. Por fim, a última fase refere-se à inspeção, manutenção e monitorização da estrutura.

Da Tabela 6 à Tabela 16 são apresentadas a descrição e identificação dos métodos de proteção e reparação, a que se associam os danos da respetiva intervenção, de acordo com os objetivos a alcançar para resolução de problemas em betão, para cada princípio descrito na norma EN 1504. Inclui-se, ainda e a título meramente informativo, alguns produtos comerciais aplicáveis a cada situação.

A Tabela 17 apresenta as propriedades relevantes dos produtos e sistemas de reparação ou proteção do betão, em função dos princípios e métodos indicados nas tabelas anteriores (Tabela 6 a Tabela 16). É de notar que alguns dos métodos de ensaio ainda não foram contemplados por normas de ensaio

O processo de escolha do método de proteção não é linear. É necessário ter em conta vários fatores e a correta identificação das condições de serviço que, atualmente, constitui um dos aspetos mais relevantes na avaliação dos mecanismos de deterioração do betão. Deste modo, as orientações contidas na norma em estudo são fulcrais para estabelecer uma relação entre a degradação existente e o método mais eficiente para se realizar a intervenção (Lopes, 2011).

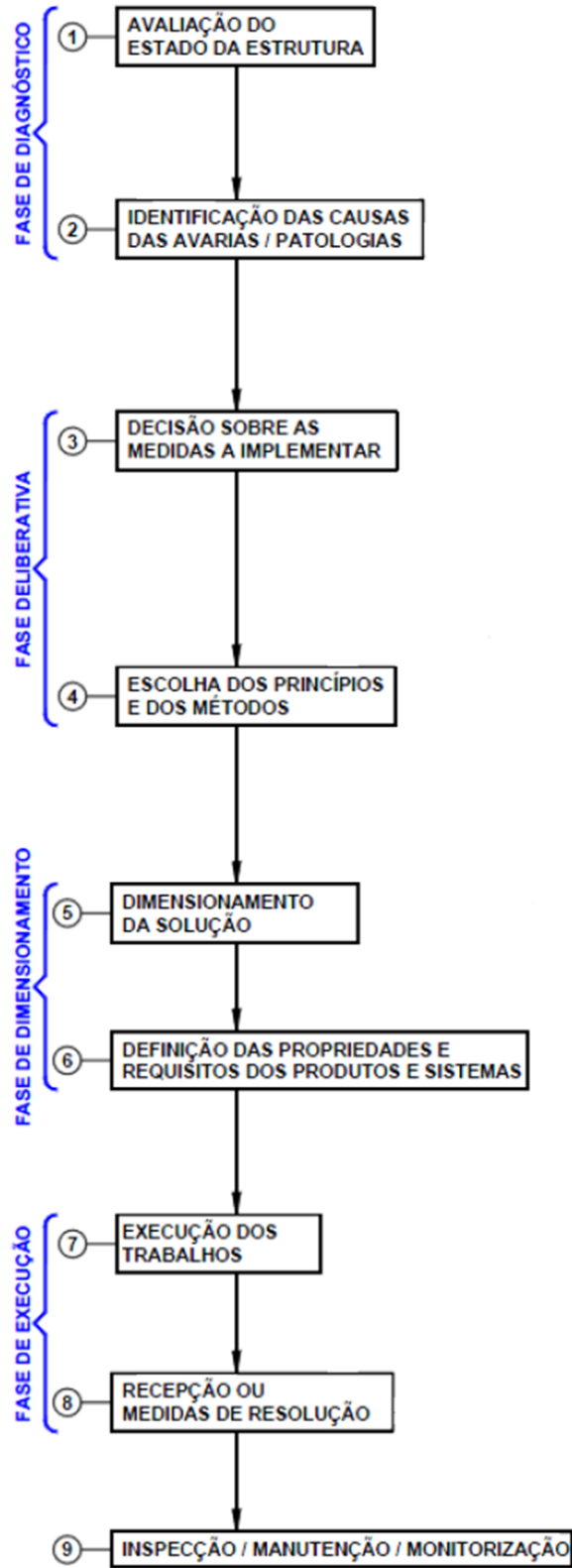
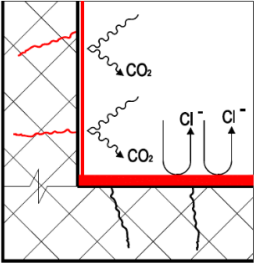


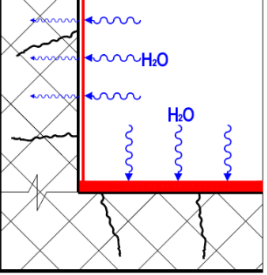
Figura 29. Etapas previstas na parte 9 da NP EN 1504 (Silva, 2008; Sousa, 2011)

**Tabela 6. Princípios, métodos e intervenção referentes a problemas do betão: Princípio 1 [PI] (adaptado de IPQ, 2009; Catarino, 2010, Pereira, 2010, BASF, 2012, Sika, 2012)**

Descrição	Método <sup>[#]</sup>	Dano <sub>[*]</sub>	Intervenção (como exemplo possível e/ou recomendável)	Produtos comerciais BASF; SIKA
<b>Proteção contra a penetração de agentes agressivos</b>  Redução ou prevenção da penetração de agentes agressivos, tais como água e outros líquidos, vapor, gás, agentes químicos ou biológicos.	1.1 Impregnação hidrofóbica [EN1504-2]	M1, M2, M3  F5, F6  Q4, Q5	Impregnação hidrofóbica e potencialmente repelente, resistente ao contato com a água e álcalis (desejável), prevenindo a passagem líquida através dos poros, mas permitindo a passagem de vapor.	Masterseal <sup>®</sup> 303; Sikagard <sup>®</sup> -700 S
	1.2 Impregnação [EN1504-2]		Aplicação de produtos de impregnação para reduzir a porosidade e reforçar a superfície, preenchendo total ou parcialmente os poros.	Masterseal <sup>®</sup> 501; Sikafloor <sup>®</sup> -2420
	 1.3 Revestimento [EN1504-2]		Aplicação de revestimentos superficiais destinados a melhorar a superfície do betão, nomeadamente na reparação de fissuras superficiais finas com movimentos até 0.3mm, devidamente seladas e com o seu movimento acomodado através da utilização de revestimentos elásticos com capacidade de absorver fissuras, ter capacidade impermeável e ser resistente à carbonatação.	Masterseal <sup>®</sup> F1120 / F1131 136/138/190/531/550; Sikagard <sup>®</sup> -680 S/-660 ES / Sikafloor <sup>®</sup> / Sikagard <sup>®</sup> -550 W Elastic/Sikagard <sup>®</sup> -670 W ElastoColor
	1.4 Tratamento superficial de fissuras (membranas adesivas) ou ligação superficial de fendas		Aplicação de material apropriado a acautelar a penetração de substâncias agressivas no betão.	Masterflex 3000 ; Sikadur <sup>®</sup> -Combiflex <sup>®</sup> / Sika <sup>®</sup> SealTape-S
	1.5 Preenchimento e selagem de fissuras/fendas [EN1504-5]		Sistema de selagem para fissuras e juntas de dilatação constituído por cola adesiva e membrana, aprovada para possível contacto com a água potável.	Concresive Injeção de materiais; Sika <sup>®</sup> Injection-201/-203/Sika <sup>®</sup> Injection-29/-304/-305. Gama Sikadur <sup>®</sup> .
	1.6 Transformação de fendas em juntas		Idem, mas em que a adaptação da fissura à função de uma junta a pode tornar capaz de acomodar movimento.	Masterflex 462TF / 468 472 / 474 / 700; Sikaflex <sup>®</sup> PU e AT/ Sikadur <sup>®</sup> -Combiflex <sup>®</sup>
	1.7 Colocação/ereção de painéis externos <sup>(a)</sup>		Proteger a superfície do betão com painéis externos protegendo das agressões ambientais e do ataque ou penetração de agentes agressivos.	ND; Sistemas SikaTack <sup>®</sup> -Panel.
	1.8 Aplicação de membranas <sup>(a)</sup>		Aplicação de uma membrana sobre a superfície do betão de modo a protegê-la de ataques ou penetração de agentes agressivos.	Membranas Conipur / Conideck; Membranas Sikaplan <sup>®</sup> , membranas líquidas Sikalastic <sup>®</sup> .

[#] parte relevante da EN 1504, se aplicável; (\*) siglas dos diferentes processos de degradação definidas na Tabela 1

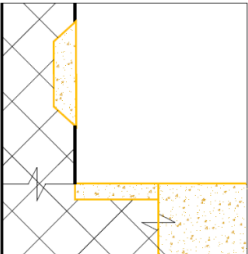
(a) estes métodos podem também ser aplicáveis a outros princípios; ND: não disponível

Tabela 7. Princípios, métodos e intervenção referentes a problemas do betão: Princípio 2 [MC] (adaptado de IPQ, 2009; Catarino, 2010, Pereira, 2010, BASF, 2012, Sika, 2012)				
Descrição	Método <sup>[#]</sup>	Dano <sub>[*]</sub>	Intervenção (como exemplo possível e/ou recomendável)	Produtos comerciais BASF; SIKA
<b>Controle da humidade</b> Ajuste e manutenção do teor em humidade no betão num intervalo de valores especificado  	2.1 Impregnação hidrofóbica [EN1504-2]	F1, F2 Q1	Tratamento do betão de forma a obter uma superfície repelente à água. Os poros e a rede capilar do betão não estão preenchidos, mas apenas revestidos com o material hidrofóbico.	Masterseal 303; Sikagard®-700 S
	2.2 Impregnação [EN1504-2]		Impregnação para reduzir a porosidade e reforçar a superfície, em que se pode formar um filme superficial descontínuo de 10 a 100 micron de espessura, que bloqueia o sistema de poros a agentes agressivos.	Masterseal 501;Gama de impregnações Sikafloor®-2420
	2.3 Revestimento [EN1504-2]		Aplicação de revestimentos superficiais destinados a melhorar a superfície do betão, para maior resistência ou desempenho face a influências externas. Pode-se acomodar movimentos térmicos e dinâmicos em estruturas sujeitas a grandes variações térmicas, vibrações, ou que tenham sido construídas com juntas inadequadas ou insuficientes	Masterseal® F1120 / F1131 136/138/190/531/550; Gama de revestimentos rígidos e elásticos Sikagard®-680 S/-660 ES / Sikagard®-550 W Elastic / Sikagard®-670 W ElastoColor
	2.4 Colocação/ereção de painéis externos		A superfície do betão deixa de estar exposta, a água não consegue penetrar, o que evita a corrosão das armaduras.	Sistemas SikaTack®-Panel.
	2.5 Tratamento eletroquímico		Aplicação de uma diferença de potencial elétrico no betão para resistir à passagem de água	ND

[#] parte relevante da EN 1504, se aplicável;

(\*) siglas dos diferentes processos de degradação definidas na Tabela 1

ND não disponível

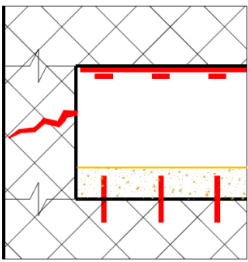
<b>Tabela 8. Princípios, métodos e intervenção referentes a problemas do betão: Princípio 3 [CR]</b> (adaptado de IPQ, 2009; Catarino, 2010, Pereira, 2010, BASF, 2012, Sika, 2012)				
Descrição	Método <sup>[#]</sup>	Dano <sup>[*]</sup>	Intervenção (como exemplo possível e/ou recomendável)	Produtos comerciais BASF; SIKA
<b>Restauração do betão</b> Reposição da forma e função específica de um elemento estrutural de betão Reabilitação de uma estrutura de betão por substituição de parte de betão 	3.1 Argamassa aplicada à mão [EN1504-3]		Reparação localizada de danos e defeitos no betão usando argamassas de reparação aplicadas manualmente. Argamassas para aplicação manual, pre-doseadas, para reparações de âmbito geral, e também para reparações com requisitos específicos. Como exemplo, argamassa monocomponente à base de cimento, areias selecionadas, sílica de fumo e resinas sintéticas.	Emaco® Nanocrete R4 / R3 / R2 / FC; Gamas Sika® Monotop® -412 S/ Sika® Monotop® -352/ Sika® Monotop® -211
	3.2 Betão novo ou reperfilamento) com betão ou argamassa [EN1504-3]	M1, M2, M3  F4, F5, F6, F7, F8	Uso de “grouting” ou enchimentos para substituir grandes áreas de betão, como a substituição de partes ou da totalidade de secções de pontes, varandas, muros, etc. Produtos com fluidez e capacidade para escoar através de obstruções e armaduras densas.	Emaco® Nanocrete R4 Fluid; Gama Sika® Monotop® -638/Sika® Grout-218/ Sika® Grout/Sikafloor® -81 EpoCem®
	3.3 Betão ou argamassa projetado [EN1504-3]		Argamassas e betões de reparação por projeção baseada em cimentos especiais modificados (eventualmente com polímeros sintéticos), particularmente nos casos em que é necessária a substituição de grandes volumes de betão, para garantir um recobrimento adicional ou em zonas de difícil acesso para vazar betão ou para aplicar o material manualmente.	Emaco® Nanocrete R4 R3; SikaCem® Gunit® -133/ Sika® MonoTop® -412 S / Sikacrete® - 103 Gunit®/GamaSika® MonoTop® -352 /SikaRep®.
	3.4 Substituição de elementos		Por vezes, pode ser mais económico substituir toda a estrutura ou parte dela do que proceder a extensos trabalhos de reparação.	ND; SikaTop® Armatec-110 EpoCem®/Sikadur®-32 N/Sika® ViscoCrete®/Sikament®

[#] parte relevante da EN 1504, se aplicável;

(\*) siglas dos diferentes processos de degradação definidas na Tabela 1

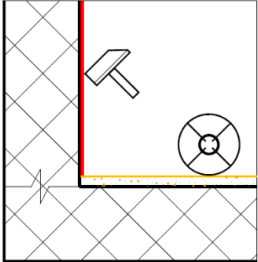
ND não disponível

**Tabela 9. Princípios, métodos e intervenção referentes a problemas do betão: Princípio 4 [SS] (adaptado de IPQ, 2009; Catarino, 2010, Pereira, 2010, BASF, 2012, Sika, 2012)**

Descrição	Método <sup>[#]</sup>	Dano <sub>[*]</sub>	Intervenção (como exemplo possível e/ou recomendável)	Produtos comerciais BASF; SIKA
<b>Reforço estrutural</b> Aumento ou reposição da capacidade resistente de um elemento da estrutura de betão  	4.1 Adição ou substituição de armaduras externas ou embebidas/internas	M1, M2, M3  F5, F8  Q4, Q5	Seleção do tamanho e disposição das armaduras, assim como escolha dos locais onde serão fixadas. Recurso a argamassa adesiva isenta de solventes e à base de resinas epóxis mais cargas especiais, como exemplo, sendo impermeável a água e ao vapor de água, desejavelmente.	Masterflow® grouts; Gama Sikadur®-30
	4.2 Adição de armaduras ancoradas em furos abertos ou a abrir [EN1504-6]		Ancoragens com eventual colagem à base de resina de epóxi, isenta de solventes.	Masterflow® 920SF; Sika® AnchorFix®-1 Sika® AnchorFix®-2+ Sika® AnchorFix®-3+
	4.3 Reforço com placas coladas [EN1504-4]		Tecido em fibras de carbono unidirecionais não corrosivas para reforço de elementos estruturais, com colagem externa.	MBrace®systems and Concrecive®adhesives; Sikadur® -30/ Sikadur® -330 /combinados com Sika® CarboDur® e SikaWrap®.
	4.4 Adição de argamassa ou betão [EN1504-3, 4]		Argamassa à base de cimento e areias selecionadas, com eventuais adições para melhoria do desempenho.	Emaco® Nanocrete; Primários de aderência Sika®, argamassas de reparação e tecnologia para betão. Sika MonoTop®-352/412 S/Sikafloor®-81/EpoCem®/Sikadur®-32 N/SikaTop® Armatec-110 EpoCem®
	4.5 Injeção de fissuras, vazios ou interstícios [EN1504-5]		Resina sintética (como exemplo, à base de poliuretano de dois componentes, sem solventes) de elevada resistência para o contato com a água potável.	Concrecive® Injeção de materiais; Sika® Injection/ Sikadur®-52 Injection/ Sika® Injection-451/ Sika® InjectionCem®-190
	4.6 Enchimento de fendas, vazios ou interstícios [EN1504-5]		Idem, mas quando as fissuras estáticas ou vazios são suficientemente largos podem ser preenchidos por gravidade ou usando uma argamassa de epóxi tixotrópica	Concrecive® injeção de materiais; Sika® Injection/Sikadur®-52 Injection/ Sika® Injection-451/ Sika®-52InjectoCem®-190/Sikadur®-31 CF
	4.7 Pré-esforço (pós-tensionamento)		Aplicação de pré-esforço por pós-tensão.	ND; Sistemas Sika® CarboStress® e Sika® Grout-300 PT

[#] parte relevante da EN 1504, se aplicável; (\*) siglas dos diferentes processos de degradação definidas na Tabela 1

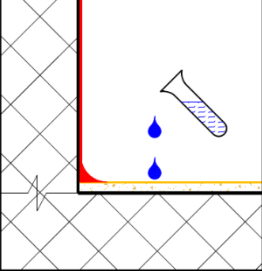
ND não disponível

<b>Tabela 10. Princípios, métodos e intervenção referentes a problemas do betão: Princípio 5 [PR]</b> (adaptado de IPQ, 2009; Catarino, 2010, Pereira, 2010, BASF, 2012, Sika, 2012)				
Descrição	Método <sup>[#]</sup>	Dano <sup>[*]</sup>	Intervenção (como exemplo possível e/ou recomendável)	Produtos comerciais BASF; SIKA
<b>Aumento da resistência física</b>  Aumento da resistência a ataques físicos ou mecânicos  	5.1 Revestimento [EN1504-2]	F1, F2, F3, F4, F5, F6, F7, F8	Somente os revestimentos reativos são capazes de garantir uma proteção adicional suficiente ao betão de forma a melhorar a sua resistência aos ataques físicos e mecânicos.	Mastertop® Flooring systems Emaco® resurfacing mortars; Sikagard®/Sikafloor®/ Sikafloor®-264/ Sikafloor®-2530 W/ Sikafloor®-390
	5.2 Impregnação [EN1504-2]		Impregnação para reduzir a porosidade e reforçar a superfície. Algumas impregnações podem reagir com alguns constituintes do betão resultando numa elevada resistência à abrasão e a ataques químicos.	ND
	5.3 Adição de argamassa ou betão [EN1504-3]		Os métodos a usar e os sistemas adequados são definidos no Princípio 3. Os produtos têm que cumprir os requisitos da EN 1504-3, classe R4 ou R3. Eventualmente, os produtos poderão ter que cumprir requisitos adicionais, como resistência à abrasão hidráulica.	(Semelhantes aos métodos 3.1,3.2 e 3.3). Sika® MonoTop®-412 S / Sikafloor®-81 EpoCem / Sika® Abraroc / Sika Grout®

[#] parte relevante da EN 1504, se aplicável;

(\*) siglas dos diferentes processos de degradação definidas na Tabela 1

ND não disponível

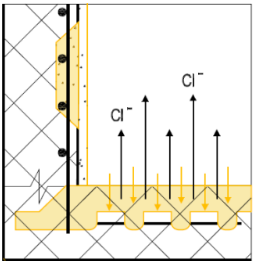
Tabela 11. Princípios, métodos e intervenção referentes a problemas do betão: Princípio 6 [RC] (adaptado de IPQ, 2009; Catarino, 2010, Pereira, 2010, BASF, 2012, Sika, 2012)				
Descrição	Método [#]	Dano [∗]	Intervenção (como exemplo possível e/ou recomendável)	Produtos comerciais BASF; SIKA
<b>Resistência aos químicos</b> Aumento da resistência da superfície de betão a deteriorações ou ataques químicos 	6.1 Revestimento [EN1504-2]	Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6, Q7, Q8	Somente os revestimentos reativos de elevado desempenho são capazes de garantir suficiente proteção adicional ao betão de forma a melhorar a sua resistência ao ataque químico.	Conipur® / Conideck coatings Ucre® flooring Masterseal® 136 / 138 / 185 / 190; Revestimentos Sikagard®-63 N PT / Sikafloor®-390/ Sikafloor®-264
	6.2 Impregnação [EN1504-2]		Impregnação para reduzir a porosidade e reforçar a superfície.	ND
	6.3 Adição de argamassa ou betão [EN1504-3]		Os métodos a usar e os sistemas adequados são definidos no Princípio 3. Para poder resistir a um certo nível de ataque químico, os produtos de base cimentosa têm que ser formulados com cimentos especiais e/ou combinados com resinas epóxi.	(Semelhantes aos métodos 3.1,3.2 e 3.3). Sikagard®-720 EpoCem® / Sikafloor®-81 EpoCem®

[#] parte relevante da EN 1504, se aplicável;

(∗) siglas dos diferentes processos de degradação definidas na Tabela 1

ND não disponível

**Tabela 12. Princípios, métodos e intervenção referentes a à corrosão das armaduras: Princípio 7 [RP] (adaptado de IPQ, 2009; Catarino, 2010, Pereira, 2010, BASF, 2012, Sika, 2012)**

Descrição	Método <sup>[#]</sup>	Dano <sub>[*]</sub>	Intervenção (como exemplo possível e/ou recomendável)	Produtos comerciais BASF; SIKA
<p><b>Manutenção e reposição da passivação</b></p> <p>Criação de condições químicas de forma a que a superfície das armaduras se mantenha ou volte a ter um estado de passivação</p> 	7.1 Aumento do recobrimento com novo betão ou argamassa [EN1504-3]		Quando da insuficiência de recobrimento, o ataque químico (proveniente da carbonatação ou de cloretos) pode ser reduzido aumentando a espessura do recobrimento, recorrendo a argamassas cimentosas ou o betão. Como exemplo, microargamassa flexível de impermeabilização com componentes pré-doseados. Resina em emulsão mais cimento e cargas especiais, aprovado para o contato com a água potável.	Emaco® Nanocrete R4 / R3 / R4 Fluid; Sika® MonoTop®-412 S/Sikacrete®-103 Gunit/SikaTop®-121/-122/Gama Sikafloor®-81 EpoCem®/ Sika® MonoTop®-352
	7.2 Substituição do betão contaminado ou carbonatado [EN1504-3]		Remoção do betão danificado e reconstrução da camada de betão sobre as armaduras, reconstituindo a proteção do aço, nomeadamente pela alcalinidade do meio envolvente.	Emaco® Nanocrete R4 / R3 / R4 Fluid; Sika® MonoTop®-412 S (Sikacrete®-103 Gunit)/ Sika® MonoTop®-352/Sika® ViscoCrete®/ Sikament®
	7.3 Realcalinização eletroquímica do betão carbonatado		Tratamento eletroquímico por processo que consiste na aplicação de uma corrente elétrica entre a armadura e uma malha anódica embebida num reservatório de eletrólito, colocado temporariamente na superfície do betão. Este tratamento não previne a futura penetração de dióxido de carbono pelo que, para ser eficaz a longo prazo, necessita de ser combinado com um revestimento apropriado que previna a carbonatação e a penetração de cloretos.	ND; Sikagard®-720 EpoCem®/Sikagard®-680 S/-660 ES

**Tabela 12 (cont.). Princípios, métodos e intervenção referentes a à corrosão das armaduras: Princípio 7 [RP] (adaptado de IPQ, 2009; Catarino, 2010, Pereira, 2010, BASF, 2012, Sika, 2012)**

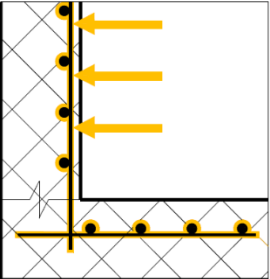
Descrição	Método <sup>[#]</sup>	Dano <sub>[*]</sub>	Intervenção (como exemplo possível e/ou recomendável)	Produtos comerciais BASF; SIKA
	7.4 Realcalinização do betão carbonatado por difusão		Aplicação de um revestimento fortemente alcalino na superfície do betão carbonatada, sendo a realcalinização conseguida através da lenta difusão do alcali através da zona carbonatada. Este processo demora bastante tempo e a correta distribuição do material é muito difícil de controlar. Após o tratamento, é recomendada a aplicação de um revestimento de proteção	Masterseal® 550 / 588; Sikagard®-720 EpoCem®/Sikagard®-680 S/660 ES
	7.5 Extração eletroquímica de cloretos		Semelhante ao de proteção catódica. O processo envolve a aplicação de uma corrente elétrica entre a armadura e uma malha que funciona como ânodo, colocada na superfície exterior da estrutura de betão. Como resultado, os cloretos são expulsos em direção à superfície. Uma vez terminado o tratamento, a estrutura de betão deve ser protegida com um tratamento adequado por forma a prevenir nova penetração de cloretos.	ND ; Sikagard®-680 S/660 ES

[#] parte relevante da EN 1504, se aplicável;

(\*) siglas dos diferentes processos de degradação definidas na Tabela 1

ND não disponível

Tabela 13. Princípios, métodos e intervenção referentes à corrosão das armaduras: Princípio 8 [IR] (adaptado de IPQ, 2009; Catarino, 2010, Pereira, 2010, BASF, 2012, Sika, 2012)				
Descrição	Método <sup>[#]</sup>	Dano <sup>[*]</sup>	Intervenção (como exemplo possível e/ou recomendável)	Produtos comerciais BASF; SIKA
<p><b>Aumento da resistividade elétrica do betão</b></p>	8.1 Impregnação hidrofóbica [EN1504-2]		Tratamento do betão de forma a obter uma superfície repelente à água. Os poros e a rede capilar do betão não estão preenchidos, mas apenas revestidos com o material hidrofóbico.	Masterseal 303; Sikagard®-700 S
	8.2 Impregnação [EN1504-2]		Impregnação para reduzir a porosidade e reforçar a superfície, em que se pode formar um filme superficial descontínuo de 10 a 100 microm de espessura, que bloqueia o sistema de poros a agentes agressivos.	Masterseal 501; Gama de impregnações Sikafloor®-2420
	8.3 Revestimento [EN1504-2]		Aplicação de revestimentos superficiais destinados a melhorar a superfície do betão, para maior resistência ou desempenho face a influências externas. Pode-se acomodar movimentos térmicos e dinâmicos em estruturas sujeitas a grandes variações térmicas, vibrações, ou que tenham sido construídas com juntas inadequadas ou insuficientes	Masterseal® F1120 /F1131/136/138/190/531/550; Gama de revestimentos rígidos e elásticos Sikagard®/ Sikagard®-680 S/660 ES/ Sikagard®--Wallcoat T/ Sikagard®-550 W Elastic/ Sikagard®--670 W Elastocolor

<b>Tabela 14. Princípios, métodos e intervenção referentes à corrosão das armaduras: Princípio 9 [CC]</b> (adaptado de IPQ, 2009; Catarino, 2010, Pereira, 2010, BASF, 2012, Sika, 2012)				
Descrição	Método <sup>[#]</sup>	Dano <sub>[*]</sub>	Intervenção (como exemplo possível e/ou recomendável)	Produtos comerciais BASF; SIKA
<p><b>Controlo catódico</b></p> <p>Criação de condições de modo a que as áreas potencialmente catódicas das armaduras fiquem incapazes de conduzir uma reação anódica</p> 	9.1 Limitação do teor de oxigénio (no cátodo) por saturação ou revestimento		Criar as condições para que qualquer zona potencialmente catódica da armadura seja incapaz de conduzir uma reação anódica. Como exemplo, impregnação tipo emulsão com propriedades inibidoras de corrosão, baseado em compostos orgânicos e inorgânicos com teor em íões cloretos < 0,10%.	Masterseal® 136 / 138 / 190 Protectosil® CIT <sup>(3)</sup> ; Sika® FerroGard®-901/ Sika® FerroGard®-903/ Sikadur®-32 N

[#] parte relevante da EN 1504, se aplicável;

(\*) siglas dos diferentes processos de degradação definidas na Tabela 1

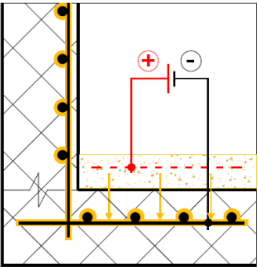
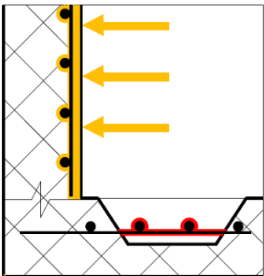
<b>Tabela 15. Princípios, métodos e intervenção referentes à corrosão das armaduras: Princípio 10 [CP]</b> (adaptado de IPQ, 2009; Catarino, 2010, Pereira, 2010, BASF, 2012, Sika, 2012)				
Descrição	Método <sup>[#]</sup>	Dano <sub>[*]</sub>	Intervenção (como exemplo possível e/ou recomendável)	Produtos comerciais BASF; SIKA
<p><b>Proteção catódica</b></p> 	10.1 Aplicação de um potencial elétrico		Na proteção catódica por corrente induzida, a corrente é fornecida por uma fonte externa e distribuída no eletrólito através de ânodos auxiliares (por exemplo uma malha colocada no topo e ligada à armadura).	Emaco® CP 10 Emaco® CP 30 Emaco® CP 60 Emaco® CP 15 Grout; Sika® Monotop® - 412 S/Sikafloor® Level-100

Tabela 16. Princípios, métodos e intervenção referentes à corrosão das armaduras: Princípio 11 [CA] (adaptado de IPQ, 2009; Catarino, 2010, Pereira, 2010, BASF, 2012, Sika, 2012)				
Descrição	Método <sup>[#]</sup>	Dano <sub>[*]</sub>	Intervenção (como exemplo possível e/ou recomendável)	Produtos comerciais BASF; SIKA
<p><b>Controlo de áreas anódicas</b></p> <p>Criação de condições de modo a que as áreas potencialmente anódicas das armaduras fiquem incapazes de participar numa reação de corrosão</p> 	11.1 Revestimento ativo da armadura [EN1504-7]		Estes revestimentos contêm pigmentos ativos que podem funcionar como inibidores e/ou proporcionam um ambiente passivo devido ao seu carácter alcalino. Apesar de ser necessário algum cuidado na sua aplicação, são menos sensíveis aos defeitos de aplicação que os revestimentos de barreira. Como exemplo, revestimento anticorrosivo à base de cimento e resina de epóxi modificada, três componentes com elevada resistência mecânica isenta de solventes.	Emaco® Nanocrete AP; Sika® Monotop® - 910 S/ SikaTop® Armatec-110 EpoCem®
	11.2 Revestimento barreira da armadura [EN1504-7]		Isolamento completo das armaduras em relação ao oxigénio e à água.	Emaco® Epoxiprimer BP; Sikadur®-32 N
	11.3 Aplicação de inibidores de corrosão no ou ao betão		Os inibidores de corrosão aplicados na superfície do betão difundem-se até às armaduras, formando uma camada protetora no aço. Os inibidores de corrosão também podem ser aplicados como adjuvantes nas argamassas de reparação ou no betão usado nos trabalhos de reabilitação.	Protectosil® CIT <sup>(a)</sup> Sika® FerroGard®-901/ Sika® FerroGard®-903

[#] parte relevante da EN 1504, se aplicável;

(\*) siglas dos diferentes processos de degradação definidas na Tabela 1

**Tabela 17. Propriedades relevantes dos produtos e sistemas de proteção (Catarino, 2010)**

Princípio de reparação		PI	MC	CR	SS		PR	RC	RP	IR	CC	CA																
■ para todas as utilizações		método de reparação (ver quadros 2 e 3)																										
■ para algumas utilizações																												
X para aplicações específicas																												
nº	prEN	Propriedades	1.1	1.2	1.4	2.1	2.2	3.1	3.2	3.3	4.2	4.3	4.4a	4.4b	4.5	4.6	5.1	5.2	6.1	6.2	7.1	7.2	7.4	8.1	9.1	11.1	11.2	11.3
1	813	Secagem superficial	■	■																								
2	814	Tempo de utilização																										
3	815	Tempo aberto	X			X					X						X		X							X	X	
4	816.1	Retracção linear para polímeros																										
5	816.2	Retracção volumétrica para polímeros																										
6	816.3	Retracção total para adesivos estruturais																										
7	816.4	Retracção linear argamassas hidráulicas																										
8	817	Velocidade de expansão																										
9	818	Resistência à compressão																										
10	819	Teor de cloretos solúveis																										
11	820	pH																										
12	821	Teor em álcalis																										
13	822	Teor em ar						X	X				X	X				X			X	X						
14	823	Módulo de elasticidade e resistência flexão																										
15	824	Coefficiente de dilatação linear																										
16	825	Viscosidade																										
17	826	Tempo de fluidez																										
18	827.1	Compatibilidade prod. injeção - betão		X											X	X												
19	827.2	Compatibilidade prod. injeção - aço		X											X	X												
20	827.3	Compatibilidade prod. injeção - elastómeros		X																								
21	830	Temperatura de transição vítrea												X														
22	831	Módulo de elasticidade em tracção directa		X																								
23	832	Tempos de presa						X	X				X	X			X		X		X	X						

Princípio de reparação		PI	MC	CR	SS		PR	RC	RP	IR	CC	CA																
■ para todas as utilizações		método de reparação (ver quadros 2 e 3)																										
■ para algumas utilizações																												
X para aplicações específicas																												
nº	prEN	Propriedades	1.1	1.2	1.4	2.1	2.2	3.1	3.2	3.3	4.2	4.3	4.4a	4.4b	4.5	4.6	5.1	5.2	6.1	6.2	7.1	7.2	7.4	8.1	9.1	11.1	11.2	11.3
24	833	Resistência à abrasão																										
25	835	"Cross-cut"																										
26	836.1	Impermeabilidade ao CO <sub>2</sub>	■	■																								
27	836.2	Permeabilidade ao vapor de água	■	■																								
28	836.3	Impermeabilidade ao O <sub>2</sub>	■	■																								
29	837.x	Absorção capilar e permeabilidade à água	■	■																								
30	837.y	Resistência à absorção capilar											X	X														
31	838	Difusão dos iões cloreto					X	X	X			X	X									X						
32	839	Resistência à carbonatação																										
33	840.1	Compatibilidade térmica: ciclos gelo-degelo																										
34	840.2	Compatibilidade térmica: choque térmico																										
35	840.4	Compatibilidade térmica: choque térmico P4																										
36	841	Resistência a ataques químicos severos															X		X									
37	842	Capacidade de selagem de fissuras		X																								
38	843	Resistência ao impacto					X	X	X		X	X	X															
39	845	Trabalhabilidade					X	X				X	X				X		X			X	X					
40	846	Ensaio de arrancamento																										
41	847	Adesão em corte																									X	X
42	848	Adesão betão-betão																										
43	849	Resistência ao corte ("slant")					X		X								X											
44	850.1	Teste de aplicação superfícies verticais	X			X	X										X		X									
45	850.2	Teste de aplicação superfícies horizontais	X			X	X										X		X									
46	851	Durabilidade de colas estruturais ao gelo																										

**Tabela 17 (continuação). Propriedades relevantes dos produtos e sistemas de protecção (Catarino, 2010)**

		Princípio de reparação		PI	MC	CR	SS		PR	RC	RP	IR	CC	CA														
		■ para todas as utilizações	■ para algumas utilizações	método de reparação (ver quadros 2 e 3)																								
		■ para aplicações específicas																										
nº	prEN	Propriedades	1.1	1.2	1.4	2.1	2.2	3.1	3.2	3.3	4.2	4.3	4.4a	4.4b	4.5	4.6	5.1	5.2	6.1	6.2	7.1	7.2	7.4	8.1	9.1	11.1	11.2	11.3
47	852.1	Fadiga sob acções dinâmicas durante cura						X	X	X			X	X								X	X					
48	852.2	Fadiga sob acções dinâmicas em serviço									X																	
49	853	Fluência em flexão																										
50	854	Desenvolvimento da resistência						X	X	X	X			X														
51	855.1	Injectabilidade em meio molhado																										
52	855.2	Injectabilidade em meio seco																										
53	856.1	Adesão de produtos injeção de poliuretano																										
54	856.2	Adesão de produtos injeção cimento/epoxy																										
55	856.3	Adesão após ciclos de temperatura																										
56	856.4	Adesão após fadiga																										
57	857	Impermeabilidade à água																										
58	858	Sensibilidade de colas ao contacto com água																										
59	859.1	Arrancamento: betão não fendilhado																										
60	859.2	Arrancamento: betão com fendas até 0,3mm																										
61	859.3	Arrancamento: carregamento ciclico																										
62	859.4	Arrancamento: altas temperaturas																										
63	860	Fluência em tracção a 23°C e a 50°C																										
64	861	Resistência à água do mar/águas sulfatadas						X	X	X			X	X								X	X					
65	862	Tixotropia de produtos protecção armaduras	X				X																					
66	863	Compatibilidade entre protecções e ânodos																										
67	864	Teor de cloretos em betão para reparar																										
68	865	Profundidade de carbonatação do betão																										
69	866	Resistência ao fogo						X	X	X	X	X	X	X	X	X												
70	867	Emissão de gases após polimerização	X	X		X	X	X	X	X		X	X	X	X	X												
71	*	Resistência a sais de degelo						X	X	X			X	X			X					X	X					
72	*	Baixa resistividade de materiais reparação						X	X	X			X	X								X	X					
73	*	Mudança de potencial eléctrico																										
74	*	Espessura de camadas										X																
75	*	Módulo de elasticidade à compressão																										
76	*	Fluência em compressão																										
77	*	Espessura de camadas						X		X		X	X	X														
78	816.4	Retracção impedida							X	X																		
79	*	Resistência ao deslizamento						X	X				X	X			X		X		X	X						
80	*	Empolamento						X	X	X			X	X			X		X		X	X						
81	*	Aplicações de protecção						X		X			X	X			X		X		X	X						
82	*	Profundidade de penetração																										
83	*	Resistência à erosão																										
84	*	Capacidade de difusão alcalina																					X					
85	*	Teor em humidade de bases																						X				
86	*	Comportamento electroquímico																								X	X	X
87	*	Estabilidade de álcalis																								X	X	
88	*	"Coverage rate"															X											
89	*	Fluência "rust"										X														X		
90	*	Ceficiente de Poisson										X	X															

Notas: 4.4a – propriedades do adesivo ... 4.4b – propriedades da argamassa ou betão de reparação  
 \* - método de ensaio ainda não normalizado

### **4.3. O caso mais frequente dos problemas e da proteção superficial**

Sendo os problemas superficiais os mais frequentes e prementes, vai-se realizar uma abordagem, ainda que sintética, aos métodos de proteção superficial do betão abrangidos pela norma EN1504 (CEN, 2004) utilizam produtos impregnantes, impregnantes hidrofóbicos e revestimentos superficiais.

#### **4.3.1. Métodos de proteção superficial**

De acordo com estudos levados a cabo com o objetivo de determinar as vantagens e desvantagens destes produtos, foram estabelecidos vários fatores que se devem considerar, no caso da aplicação de produtos de proteção superficial. Deste modo, os fatores a ter em conta, de acordo com Basheer *et al.* (1997), são os seguintes:

- Processos de transporte no substrato intervencionado;
- Durabilidade do substrato intervencionado;
- Durabilidade dos tratamentos de superfície;
- Influência das propriedades do substrato;
- Requisitos de engenharia e económicos;
- Desempenho em serviço.

A partir da necessidade de cumprir os fatores apresentados, Shields *et al.* (1992) criaram um fluxograma (Figura 30) que pretende auxiliar a escolha do sistema de proteção mais adequado tanto para novas construções como para reabilitação de construções mais antigas. Este fluxograma pode ser útil na escolha de um sistema de proteção superficial, mas tem por base a premissa de que o desempenho de um tratamento é diferente da sua durabilidade, ou seja, os tratamentos podem conferir proteção, sem serem necessariamente duráveis.

A aplicação destes sistemas de proteção superficial deve obedecer aos princípios referidos anteriormente, o que conduz a uma correspondência entre os problemas a solucionar (princípios) e o tipo de produto a utilizar. As relações entre os princípios e os métodos abrangidos pela norma são esquematicamente ilustradas na tabela 18.

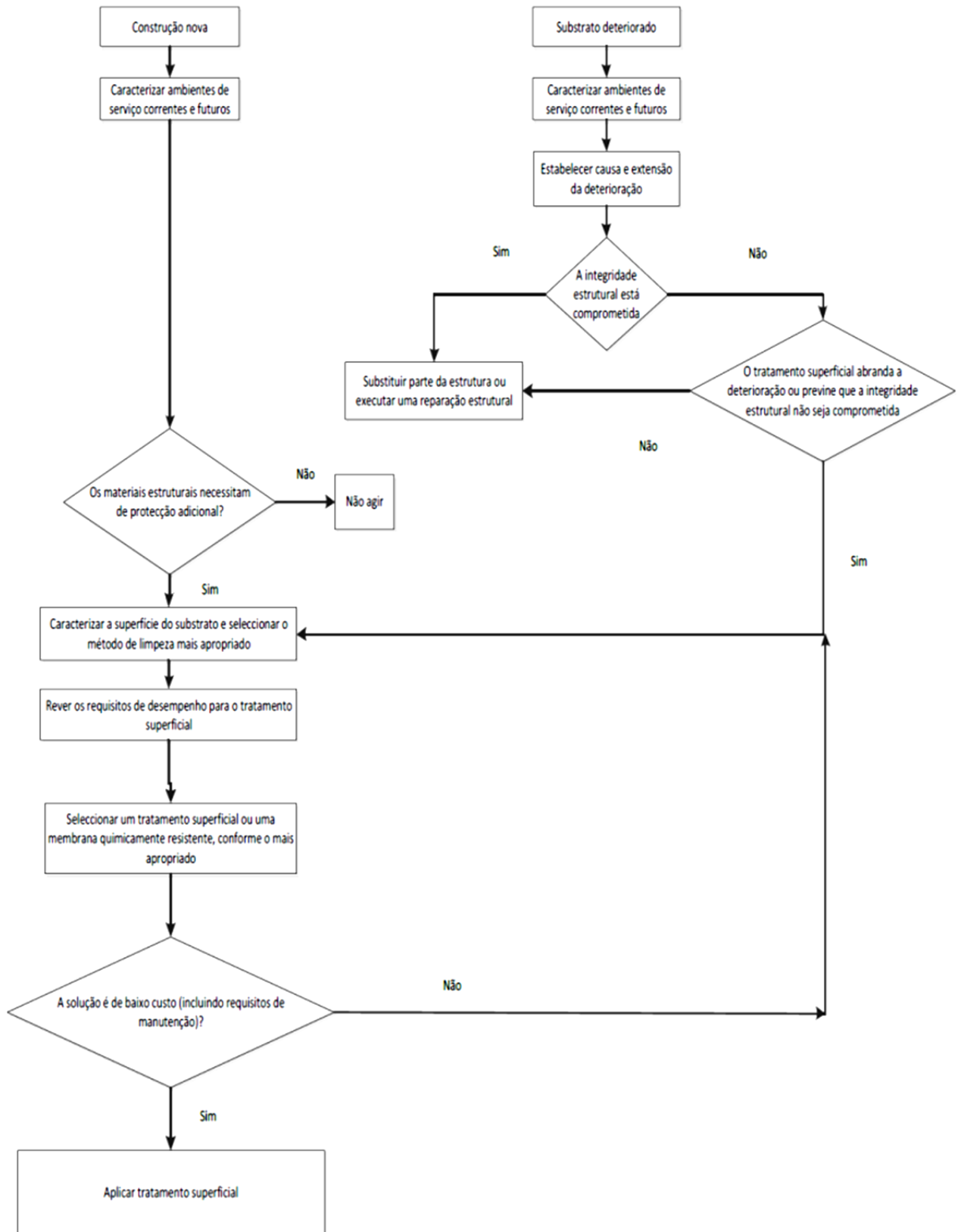


Figura 30. Fluxograma da escolha do tratamento superficial (Shields *et al.*,1992; Lopes, 2011)

<b>Tabela 18. Relações entre princípios e métodos de proteção a adotar (IPQ, 2009)</b>	
<b>Princípio</b>	<b>Método de proteção</b>
1 [PI] Proteção contra o ingresso	Impregnante hidrofóbico Impregnante Revestimento por pintura
2 [MC] Controlo da humidade	Impregnante hidrofóbico Revestimento por pintura
5 [PR] Resistência física / Melhoria da superfície	Revestimento por pintura Impregnante
6 [RC] Resistência aos produtos químicos	Revestimento por pintura
8 [IR] Aumento da resistividade por limitação do teor de humidade	Impregnante hidrofóbico Revestimento por pintura

Por definição, um impregnante realiza um tratamento no betão, destinado a reduzir a porosidade superficial e a reforçar a superfície, ficando os poros e capilares parcial ou completamente preenchidos. Este tratamento produz geralmente uma película fina descontínua sobre a superfície do betão. Os ligantes utilizados podem ser, por exemplo, polímeros orgânicos. A Figura 31 representa esquematicamente uma impregnação típica.

Por seu turno, uma impregnação hidrofóbica destina-se a tratar o betão de modo a produzir uma superfície repelente à água. A superfície interior dos poros e capilares fica revestida mas os poros não ficam preenchidos. Não há película sobre a superfície do betão e não há praticamente alteração da sua aparência. A título de exemplo, os componentes ativos de uma impregnação hidrofóbica podem ser silanos ou siloxanos (IPQ, 2009). Uma representação esquemática deste tipo de tratamento é apresentada na Figura 32.

Os revestimentos por pintura são tratamentos destinados a produzir uma camada protetora contínua sobre a superfície do betão. A espessura é geralmente compreendida entre 0.1 e 5.0 mm. Certas aplicações podem necessitar duma espessura superior a 5.0 mm. Os ligantes podem ser, por exemplo, polímeros orgânicos contendo cimento como carga ou cimento

hidráulico modificado com uma dispersão de polímero, Figura 32.

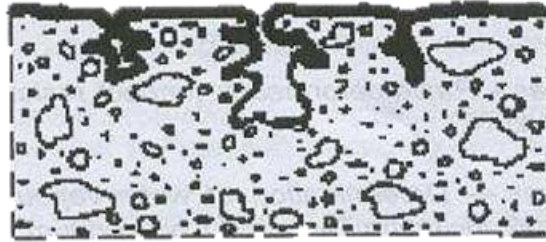


Figura 31. Esquema de uma impregnação típica (IPQ, 2009)

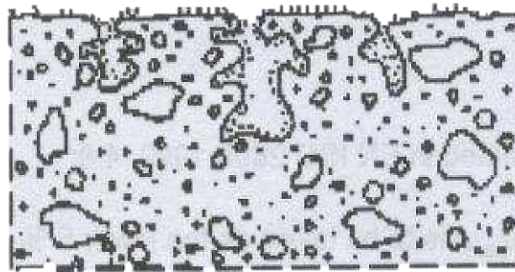


Figura 32. Esquema de uma impregnação hidrofóbica típica (IPQ, 2009)

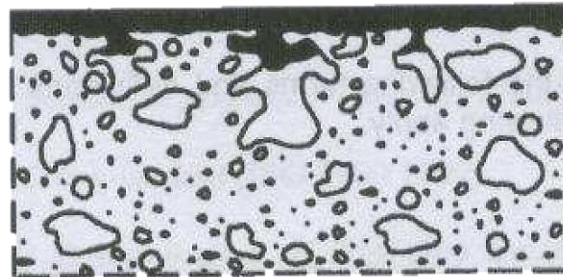


Figura 33. Esquema de um revestimento por pintura (IPQ, 2009)

#### 4.3.2. Seleção do método de proteção

A seleção de um tipo de produto ou sistema de proteção superficial não é simples, uma vez que mais que um produto pode satisfazer um determinado requisito. Por outro lado, a seleção do produto deve também ser feita recorrendo-se à avaliação de vários fatores, como a facilidade de aplicação, considerações económicas, durabilidade e assistência técnica do fabricante. É, então, fulcral a análise de todas as variantes para tomar a melhor decisão, referindo-se de seguida os fatores mais importantes a considerar (Basheer et al. 1997;

Rodrigues, 1998; Lopes, 2011):

- Substrato original:
  - Material de construção;
  - Construção nova ou reabilitação;
  - Condições da estrutura;
  - Presença de outro tipo de revestimento ou sistema de proteção;
  - Contaminação da superfície.
- Condições ambientais:
  - Atmosféricas, ambiente marinho;
  - Presença de humidade;
  - Temperatura;
  - Presença de químicos agressivos.
- Facilidade de aplicação:
  - Método de aplicação (trincha, impregnação, rolo, etc.);
  - Tempo de vida útil;
  - Exigências do estado do substrato;
  - Exigências de condições ambientais;
  - Riscos de toxicidade ou inflamabilidade.
- Considerações económicas:
  - Custo inicial dos produtos;
  - Custo inicial da preparação da base, aplicação e acessibilidade;
  - Intervalo de repintura (durabilidade do sistema de proteção);
  - Facilidade de repintura.
- Durabilidade:
  - Utilização de produtos de comportamento em serviço já conhecido;
  - Análise da durabilidade do sistema ou produto em relação a: adesão entre produto e substrato, resistência aos UV, resistência à água, resistência química, resistência ao impacto, elasticidade, dureza da película, resistência à abrasão, entre outros.
- Assistência técnica:

- Facilidade de reposição de “stocks”;
- Fichas técnicas dos produtos;
- Garantias de durabilidade;
- Apoio na execução da obra.

Os sistemas de proteção permitem aumentar a durabilidade e otimizar o comportamento das estruturas de betão. No entanto, antes da sua aplicação nas estruturas deve reconhecer-se o comportamento de cada sistema à distância. Além disso, é igualmente importante fazer-se uma monitorização continuada da estrutura para deteção dos problemas e sua consequente reparação.

Pode dizer-se que ainda não existe um sistema uniformizado para a escolha do sistema a utilizar, havendo, sim, uma dispersão de dados existentes e de resultados de investigações. Por isso, devem ser ponderados os vários fatores acima referidos, de modo a que a seleção do sistema de proteção a utilizar seja o mais adequado possível.

## **5. Monitorização e seguimento evolutivo nos principais problemas em betão e argamassas**

Numa perspetiva meramente informativa e levemente complementar, efetua-se a apresentação da importância da verificação e monitorização pós-intervenção, bem como métodos e equipamentos associados. Não tem, portanto, este capítulo outra função que não apenas a introdutória, dispensando-se de uma enumeração exaustiva e detalhada, de acordo com os objetivos a que se propôs este trabalho.

A monitorização enquadra-se nas técnicas de inspeção e ensaio, que podem proporcionar dados importantes aos técnicos responsáveis pelas intervenções da conservação, reparação e recuperação de estruturas de betão armado, entre outras, ajudando a:

- Apoiar o controlo da execução e realizar a avaliação da conformidade das estruturas executadas;
- Determinar as causas de danos e anomalias existentes nessas estruturas, possibilitando, assim, uma intervenção mais adequada;
- Avaliar corretamente a importância e a extensão das degradações existentes;
- Adotar medidas corretivas menos intrusivas e mais adequadas;
- Definir e planear atempadamente as intervenções, atuando preventivamente;
- Monitorar o comportamento dessas intervenções.

Paralelamente, essas técnicas podem constituir um auxiliar precioso no controlo de qualidade das estruturas, quer durante a fase de construção, quer, mais tarde, quando submetidas a uma intervenção corretiva, a fim de garantir a conformidade com as especificações, em particular, as que visam assegurar a necessária durabilidade.

A observação estrutural, e genérica em termos de intervenções construtivas, durante um período de tempo pode ser necessária, não só para obter informação útil quando se suspeita

de fenómenos não estabilizados, mas também durante um processo faseado de intervenção estrutural. Durante esta última, o comportamento monitorizado em cada fase, bem como os respetivos dados recolhidos serão a base de quaisquer trabalhos adicionais (abordagem baseada na observação) (ICOMOS, 2003).

O controlo de comportamento estrutural através da monitorização, com ou sem recurso a instrumentos de medida, constitui um meio muito valioso e fidedigno de apoio à avaliação do real estado de uma estrutura existente. A observação e o acompanhamento da evolução temporal de patologias numa estrutura contribuem para clarificar os fenómenos que lhe deram origem e, assim, melhor definir as estratégias e técnicas para as mitigar ou mesmo eliminar.

Por monitorização deve-se, sobretudo, entender como os trabalhos de acompanhamento e verificação da solução interventiva adotada, no sentido de confirmar a sua validade e durabilidade.

Muitas das vezes, a monitorização pode não necessitar do emprego de qualquer equipamento, seja este simples ou sofisticado, bastando o exame visual e tátil, sobretudo. Contudo, dependendo da responsabilidade, dimensão e menor sensibilidade dos sentidos humanos (ao caso em seguimento), o uso de instrumentos complementares pode ser indispensável. Quando da existência de aparelhos mecânicos e/ou elétricos complementares, é corrente o tratamento de dados por programas computacionais ou folhas de cálculo, bem como a eventual recolha desta informação na forma digital direta.

A monitorização assistida consiste, em geral, no registo de parâmetros essenciais, tais como: (i) deformações; (ii) movimentos de juntas; (iii) aberturas de fendas; (iv) nivelamento; (v) verticalidade; (vi) variações de temperatura; (vii) tensões de serviço e residuais; (viii) assentamento de fundações; (ix) variações do nível freático, entre outros. Para todos estes tipos de grandezas, existe atualmente uma vasta gama de equipamentos possíveis de medição.

De notar que existem diversos tipos de ensaios, designadamente relacionados com materiais de construção (como pedras naturais) que podem ser envolvidos e utilizados no apoio à

monitorização, tais como:

- Ensaio de tração;
- Ensaio de compressão;
- Ensaio de dureza;
- Ensaio de dobragem e flexão;
- Ensaio de tenacidade;
- Ensaio de fadiga;
- Ensaio de fluência;
- Ensaio de resistência gelo-degelo;
- Ensaio de desgaste por abrasão;
- Ensaio de resistência ao escorregamento/derrapagem.

Pela especificidade do tema deste trabalho, e tendo em consideração o uso correto do volume de páginas a apresentar, apenas alguns destes ensaios serão integrados nas tabelas-resumo apresentadas adiante. Igual procedimento será adotado para outro tipo de ensaios e exames a omitir (como ensaios de termografia, entre outros).

Idealmente, o registo deve ser contínuo e de preferência em ligação com um sistema de aquisição e armazenamento de dados possibilitando um tratamento detalhado da evolução das medidas obtidas. Naturalmente que um tal sistema se torna muito complexo e dispendioso para poder ser utilizado de forma corrente, justificando-se apenas em casos especiais de construções de inestimável valor histórico, tais como os exemplos italianos da Basílica de S. Marcos em Veneza (Rossi, 1998) ou a Catedral de Pavia (Macchi, 2000). Na maioria dos casos são instalados instrumentos de medida, ou definidos pontos de referência adequados, e efetuam-se leituras periódicas em sucessivas visitas à construção em causa (Arêde e Costa, 2002).

O estudo físico-químico local e laboratorial é, também, um recurso importante e, não poucas vezes, fundamental.

De uma forma muito simples, pode dizer-se que o processo de monitorização pode comportar as seguintes fases ou partes:

- 1) O que procurar e controlar com a monitorização;
- 2) Quanto tempo se justifica o acompanhamento e com que periodicidade;
- 3) Qual o papel e os limites da verificação pelos sentidos;
- 4) Quais os aparelhos e ferramentas mais correntes e a sua melhor utilização.

### **5.1. Razão de ser e finalidade da monitorização**

Normalmente, os sistemas de monitorização têm como objetivo o registo de alterações na estrutura ou órgãos construtivos, como deformações, larguras de fenda, temperatura, etc. A monitorização dinâmica é usada para registar acelerações, como as que ocorrem em zonas sísmicas. A monitorização pode também assumir a função de alarme. A forma mais simples e mais económica para monitorizar fendas consiste na colocação de testemunhos ou fissurómetros. Alguns casos requerem o uso de sistemas de monitorização computadorizados, para registar os dados em tempo real (ICOMOS, 2003).

Como regra geral, o uso de um sistema de monitorização deve ser sujeito a uma análise custo-benefício, para que sejam recolhidos apenas os dados estritamente necessários para revelar a evolução dos fenómenos.

Será de esperar que a monitorização sirva para confirmar que os problemas tratados estão sanados e não se repetem, ou, no mínimo, que o seu ressurgimento e grandeza se encontram controlados.

### **5.2. Duração e periodicidade da monitorização**

A duração de uma monitorização, quando não completamente enquadrada por resoluções normativas, será a necessária para garantir que o prazo de eficácia da intervenção corretiva está assegurado.

Um dos pesos maiores na decisão da permanência e intensidade de uma monitorização é a bem conhecida relação custo-benefício: um prolongamento desajustado, na procura de sintomas que se podem confundir com uma resposta normal dos materiais e do seu envelhecimento, não é de bom senso e não tem justificação. Por outro lado, o abandono precoce (sobretudo em situações sem grande histórico experimental anterior) pode conduzir a situações de degradação não controlada que, no limite, podem não só reverter o efeito positivo da operação, como terminar numa situação pior que a anterior a esta.



Independentemente do tipo de equipamento mais adequado para uma dada campanha de medições, é importante definir cuidadosamente um plano de monitorização racional capaz de abranger as patologias encontradas na construção e compatível com a sua situação atual. Esse plano deve estabelecer os locais de medição, o que se pretende medir e uma forma adequada para o fazer, procurando obter complementaridade e mesmo alguma redundância de medições que possibilite comparar resultados obtidos por diferentes meios ou colmatar falhas de medidas que sempre ocorrem.

Neste contexto importa acrescentar que medições excessivas ou inapropriadas não contribuem necessariamente para a melhoria do estudo e da avaliação do estado da estrutura, já que aumentam os custos e o tempo de análise (Arêde e Costa, 2002).

### **5.3. Validade e limites da monitorização pelos sentidos**

Não existem estudos, que se conheçam, de qual a percentagem de casos em que no pós-corretivo a monitorização pelos sentidos produziu um acompanhamento satisfatório.

De notar que quando se fala em sentidos isso não indica que atitudes simples (como testemunhos de gesso para controlar a abertura de fendas, medida direta da flecha de uma viga ou laje, etc.) não estejam incluídas nesta classificação. Na verdade, incluem-se nesta categoria, como se resume na Tabela 19, todos os tipos de exame que não justifiquem a sua presença no próximo subcapítulo (seja pela sofisticação dos equipamentos, pela profundidade do estudo físico-químico, ou pelo preço, nomeadamente e entre outros fatores).

<b>Tabela 19. Tipos de monitorização pelos sentidos: aplicação e eficácia</b>			
<b>Tipos</b>	<b>Utensílio</b>	<b>Destino e aplicação</b>	<b>Eficácia</b>
Abertura de fenda simples.	Visão ou testemunhos intactos que podem fissurar facilmente (ex: amostras de gesso).	Verificação expedita direta do aparecimento de fissuração. Deslocamentos e assentamentos, absorção de água, resistência à humidade e resistência mecânica.	Quando a fissura é muito discreta (inferior a 0,3mm) pode existir alguma dificuldade no seu reconhecimento.
Medição de abertura de fenda. 	Régua graduada ou comparador de fissuras (régua com linhas de diferentes espessuras).	Comparação da abertura da fenda com uma régua graduada ou um comparador de fissuras. Deslocamentos e assentamentos, absorção de água, resistência à humidade e resistência mecânica.	Idem.
Medição de deslocamentos (sobretudo em flechas de vigas e lajes). 	Régua graduada (unidade mínima o milímetro).	Acompanhamento de deslocamentos instantâneos ou no tempo de deslocamentos.	Quando o deslocamento é muito discreto (inferior a 0,3mm) pode existir alguma dificuldade no seu reconhecimento. Não tem muita utilidade na quantificação de deformações.

#### 5.4. Monitorização assistida

Quando uma monitorização mais simples e tradicional não é satisfatória, o recurso a instrumentação ou análises físico-químicas é necessária. Deste modo, a monitorização assistida pode ser dividida em duas áreas: i) mecânica e/ou elétrica; ii) físico-química. Os danos da monitorização também podem ser classificados em termos destrutivos e não-destrutivos, sendo que os últimos se caracterizam por ações diretas não invasivas e os resultados obtidos são, em geral, de tipo qualitativo (quando se pretendem valores rigorosos quantitativos, poderão ter que se adotar ensaios destrutivos).

Na primeira encontram-se monitorizações tão diversas como: i) ensaios de carga; ii) extensómetros (medidas de deformações e de fendas); iii) precursão; iv) extração e carotagem; v) termografia; vi) ensaios de som e ultra-som; vii) topografia; viii) baroscopia e videoscopia; ix) radar; x) vibrações. Na segunda, incluem-se monitorizações tais como: i) análises de teor de cloretos; ii) análises de teor de sulfatos; iii) pH; iv) ensaios de porosidade; v) ensaio de permeabilidade; vi) ensaio de desgaste superficial; vii) etc. De notar que por meios eletromecânicos podem-se obter dados químicos sobre betão e argamassas hidráulicas.

Os tipos de monitorização mais correntes são, sem dúvida, o controle de deformações (e/ou deslocamentos), abertura de fendas ou de juntas. Existem várias técnicas, desde a mais clássica que assenta na colocação de testemunhos em gesso até às mais sofisticadas que requerem o uso de extensómetros elétricos ligados a um sistema de aquisição e registo do sinal.

A técnica dos testemunhos, sendo a mais simples e popular, apresenta porém a desvantagem de não permitir quantificar a evolução do tempo da abertura da fenda ou da junta. A fim de obviar este inconveniente é possível usar fissurómetros com escala de medida (como os constituídos por duas placas de vidro acrílico transparente, deslizantes uma sobre a outra e dotadas de uma escala reticulada cotada em milímetros) ou então extensómetros mecânicos móveis posicionados em duas pequenas placas metálicas fixa em cada um dos lados da fenda.


O controlo de deformações de elementos estruturais pode ser feito com recurso à instalação de defletómetros. Para utilização corrente e pouco dispendiosa, os defletómetros mecânicos são os mais adequados, encontrando-se já correntemente disponível este tipo de instrumentos com fácil leitura digital. Para registos contínuos e mais precisos podem ser adotados os transdutores de deslocamentos elétricos, correntemente designados por LVDT (Linear Voltage Differential Transducer), ou os transdutores de fio que, ligando dois pontos de medida relativamente afastados (até alguns metros), permitem determinar o seu deslocamento relativo através da variação do comprimento do fio medida em potenciómetros elétricos, ou ainda os transdutores baseados em variação de pressão de um

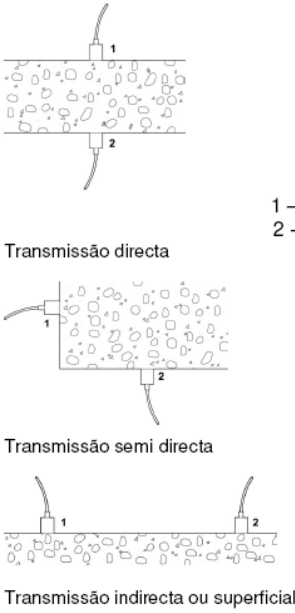
líquido num sistema de vasos comunicantes.

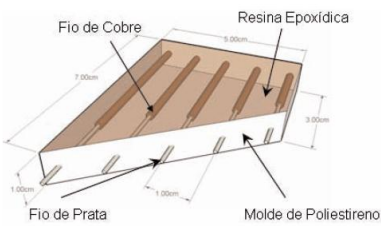
Por sua vez, o controle de rotações ou de verticalidade pode ser feito com recursos inclinómetros. A medição de forças ou tensões “in situ” é um processo menos corrente e mais dispendioso. Pode-se recorrer aos macacos-planos ou então a células de carga (construída com base em extensómetros elétricos) que fornecem informação localizada da variação da tensão normal na zona onde se encontrem instaladas. As células de carga são equipamentos dispendiosos e necessitam de estar ligados a um sistema de aquisição de dados.




Um ensaio que vem ganhando popularidade, entre o meio técnico, é o ensaio ultrassónico do betão, que consiste na determinação da velocidade de propagação dum impulso ultrassónico, entre dois pontos de medida ([www.oz-diagnostico.pt/fichas/](http://www.oz-diagnostico.pt/fichas/)). Este ensaio permite aquilatar várias propriedades do material, como a sua integridade física, módulo de elasticidade, entre outras.

Na Tabela 20 faz-se um resumo dos tipos mais comuns de ensaio, dispositivos e técnicas de monitorização assistida, sendo de referir que existe um número considerável de outros ensaios, mas que se admitem menos usados.

<b>Tabela 20. Tipos de ensaios, dispositivos e técnicas de monitorização assistida (Montemor et al., 2007; Arêde e Costa, 2002, entre outros)</b>			
<b>Tipos</b>	<b>Utensílio</b>	<b>Destino e aplicação</b>	<b>Eficácia</b>
Abertura de fenda assistida. 	Verificação de abertura de fenda e eventual medida de sua dimensão, instantânea ou no tempo (ex: “crack meter”, conforme imagem ao lado).	Verificação expedita direta do aparecimento de fissuração. Deslocamentos e assentamentos, absorção de água, resistência à humidade e resistência mecânica.	Quando a fissura é muito discreta (inferior a 0,3mm) pode existir alguma dificuldade no seu reconhecimento.

<p>Ensaio de carga</p>	<p>Colocação de cargas em pontos específicos da peça a monitorizar e leitura dos deslocamentos provocados, instantâneos e no tempo.</p>	<p>Flechas de vigas e lajes, bem como controlo de fissuração.</p>	<p>Boa acuidade, mesmo tendo em conta que, em geral, os resultados são macroscópicos (apenas valores perceptíveis pelo ser humano são medidos, em geral, pelo que se confundem com ensaios pelos sentidos, ainda que possam ter monitorização digital, como no ponto seguinte: extensómetros).</p>
<p>Extensómetros</p>	<p>Conjunto de extensómetros com leitura contínua ou periódica de deformações.</p>	<p>Colocação e leitura de deformações através de extensómetros colocados em diversos pontos da peça a monitorizar.</p>	<p>Resultados bastantes válidos, mas dependem da boa colocação dos pontos de leitura, de um adequado tratamento computacional e da experiência do utilizador.</p>
<p>Boroscopia e videoscopia.</p>	<p>Sistema portátil, normalmente com unidade central dotada dum painel de controlo, dum monitor e dum gravador de vídeo.</p>	<p>Inspeção do interior de furos e espaços confinados com câmara vídeo de pequeno diâmetro.</p>	<p>Depende da da qualidade da câmara de vídeo montada, da flexibilidade/rigidez do cabo e da espessura do mesmo, da autonomia e potência do sistema de iluminação e da possibilidade de visão radial ou axial.</p>
<p>Ensaio sónico e ultrassónico.</p>  <p>1 – Tx 2 - Rx</p> <p>Transmissão directa</p> <p>Transmissão semi directa</p> <p>Transmissão indirecta ou superficial</p>	<p>Emissor elétrico ou sonoro ou transdutor-emissor (Tx, na figura ao lado) e um transdutor-recetor transdutor emissor (Rx, na figura ao lado). Normalmente, composto por uma unidade central, onde se encontra o gerador de impulsos elétricos e o circuito de leitura, e por dois transdutores.</p>	<p>Consiste na determinação da velocidade de propagação dum impulso ultrassónico, entre dois pontos de medida, tendo em vista obter informação sobre: i) características mecânicas; ii) homogeneidade; iii) presença de fissuras e defeitos. Poder-se-á obter a seguinte informação: i) Estimativa do módulo de elasticidade e da resistência à compressão, a partir de correlações empíricas com a velocidade de propagação das ondas sónicas; ii) Homogeneidade das características dos materiais constituintes; iii) Presença de fendas no material contínuo e iv) Presença e efeitos de anteriores reforços (ex. de argamassa).</p>	<p>Resultados dependentes da potência e sensibilidade do equipamento, bem como da espessura a percorrer pelo sinal, distribuição e densidade das armaduras. Os impulsos ultrassónicos são geralmente mais adequados para estruturas contínuas com elevada homogeneidade, caso das estruturas sem betão.</p>

<p>Tomografia sónica</p>	<p>Similar ao anterior, mas com processamento e tratamento computacional.</p>	<p>Esta técnica de ensaio baseia-se na anterior mas, sendo mais elaborada no processamento e análise dos resultados da propagação das ondas sónicas, fornece um mapa detalhado da distribuição da velocidade do som numa determinada secção plana da estrutura.</p>	<p>Bastante usado em estruturas de betão, tem vindo a ser aperfeiçoado.</p>
<p>Sensor de cloretos.</p> 	<p>Sonda de cloretos, constituída por vários sensores.</p>	<p>Prevenção e controlo do fenómeno de corrosão em estruturas de betão armado.</p>	<p>Os sensores devem apresentar características básicas importantes, como como durabilidade e fiabilidade, além de operacionalidade numa gama alargada de sensibilidade nas concentrações de cloretos.</p>
<p>Radar</p>	<p>Equipamento do tipo radar, com recurso a emissão e observação de ondas eletromagnéticas de alta-frequência.</p>	<p>Uso de ondas eletromagnéticas de alta-frequência (100MHz-1GHz) emitidas com impulsos muito curtos e permite a localização das superfícies de separação entre materiais de diferentes características.</p>	<p>Tal como a tomografia sónica, trata-se de um ensaio de elevados custos e de utilização mais reservada a casos especiais.</p>
<p>Ensaios dinâmicos e vibratórios</p>	<p>Equipamento que impõe e relaciona forças dinâmicas e deslocamentos associados</p>	<p>Medição das frequências próprias de vibração da estrutura e, eventualmente, no seu acompanhamento ao longo do tempo. Dado que tais frequências dependem diretamente da rigidez da estrutura (uma diminuição de rigidez conduz a uma redução da frequência) e inversamente da massa envolvida (um aumento de massa corresponde também a uma diminuição da frequência), facilmente se compreende que, mantendo-se a massa inalterada, então o controlo da frequência corresponde a fazer um controlo indireto da rigidez</p>	<p>Ensaio não-destrutivo bastante fiável, de grande utilidade e com crescente utilização para a verificação do comportamento estrutural e da integridade da construção, assim como para a calibração de parâmetros de comportamento global. Para estruturas simples, com homogeneidade material, poucos graus de liberdade e em que a origem da rigidez estrutural é perfeitamente conhecida, a aplicação deste método é direta, simples e eficaz.</p>

<p>Ensaio de arrancamento (pull-off) – destrutivo.</p> 	<p>Existem diversos tipos de equipamentos, baseados na fixação à peça e extração de cone de rotura, por tração.</p>	<p>Tensão de aderência por resistência ao arrancamento.</p>	<p>Esta técnica, embora destrutiva, permite identificar o tipo de rotura do betão ou argamassa, tanto em termos de resistência, quer da sua natureza (adesiva ou coesiva).</p>
<p>Ensaio de compressão e tração destrutivos (carotagem).</p> 	<p>Equipamento de carotagem e de ensaio de compressão e/ou flexão.</p>	<p>A extração de pequenas carotes de pontos mais representativos da estrutura e seu ensaio, por rebentamento ou colapso por compressão e/ou flexão (de onde se pode obter resistência à tração).</p>	<p>Bastante rigor quantitativo nos valores das resistências do materiais, nomeadamente em compressão e flexão/tração.</p>
<p>Ensaio de compressão não destrutivo ou semi-destrutivo.</p> 	<p>Esclerómetro pendular ou similar (Schmidt).</p>	<p>Dureza/resistência superficial.</p>	<p>Pode dar resultados que não evidenciam a verdadeira resistência do betão da peça, uma vez que se limitam a avaliar a zona superficial.</p>

Na Tabela 21 sintetizam-se, ainda, os principais ensaios, dispositivos e técnicas numa perspetiva de intervenção estrutural (Oz, 2012).

Tabela 21. Principais ensaios, dispositivos e técnicas para intervenções estruturais (Oz, 2012)

Ensaios, dispositivos e técnicas	I&E preliminar	Levantamento da geometria e anomalias	Caracterização das propriedades mecânicas dos materiais	Caracterização da envolvente	Validação do modelo	I&E de técnicas e materiais	I&E de controlo da qualidade	I&E finais	Monitorização
Alongâmetro mecânico					X				X
Boroscopia e videoscopia	X	X					X	X	
Ensaio de arrancamento						X	X		
Ensaio de carga					X		X	X	
Ensaio de impacto s/ pavim.							X	X	
Ensaio ultra-sónico		X					X	X	
Extensómetro de corda vibrante					X				X
Extensómetro eléctrico					X				X
Fissurómetro telltale									X
Fissurómetro de corda vibrante					X				X
Higrómetro	X	X		X				X	X
Impacto-eco		X					X	X	
Inclinómetro									X
Inspeção visual para especialistas	X								
Levantamento visual de anomalias	X	X	X					X	
Martelo de Schmidt	X		X						
Medição expedita da permeabilidade	X								
Medição dos potenciais eléctricos		X						X	X
Medição da resistividade		X							
Medição de vibrações					X			X	X
Medição do teor de cloretos	X	X					X	X	
Medidor óptico de fissuras	X								
Pacómetro		X					X		
Pêndulo e telecoordinómetro					X				X
Penetração	X		X						
Penetrómetro e SPT			X						
Percussão		X							
Radar		X					X		
Reacção da fenoltaleína	X								
Resistência de polarização		X						X	
Teodolito automático					X				X
Termografia		X							
Termopar e termómetro				X	X				X
Topografia e fotogrametria		X							
Vibração forçada					X			X	X

## 6. Caso prático na resolução de um problema de degradação em pilares de betão armado sujeitos a ambiente marítimo

### 6.1. Descrição do problema em elementos de betão

De forma a ilustrar a importância da identificação de problemas e respetivas soluções em betão, será apresentado um caso prático de reabilitação de pilares de betão armado, sujeitos a fenómenos de corrosão das armaduras, decorrente do efeito combinado da carbonatação do betão e da exposição e penetração de cloretos.

Os pilares em análise fazem parte da estrutura de um edifício cuja construção foi concluída em 1993, atualmente com cerca de 19 anos. Este edifício está localizado próximo da orla marítima de Apúlia, concelho de Esposende, a cerca de 200 m da praia. Nas Figura 34 e Figura 35, são apresentadas algumas fotografias da vista geral do empreendimento.



Figura 34. Vista geral do edifício no *Google Earth*, onde se evidencia a proximidade da praia.



**Figura 35. Fotografias do exterior e envolvente do edifício**

Os pilares danificados localizam-se na fachada Poente do edifício, devido à maior exposição ao ambiente marítimo.

Nas figuras seguintes mostram-se alguns detalhes dos problemas identificados nos pilares de betão armado, nomeadamente o destacamento do betão na Figura 36 e a corrosão das armaduras que são visíveis na Figura 39.



**Figura 36. Identificação do problema: pilares de betão armado com grande fissuração e destacamento do betão**

## **6.2. Causas prováveis e soluções para o problema em estudo**

As causas para este problema nos pilares deste edifício estão, presumivelmente, associadas à exposição ao ambiente marítimo, rico em cloretos, e à sua eventual interação com os efeitos da carbonatação.

A ação do  $\text{CO}_2$  conduziu a uma redução do pH do betão, facilitando a penetração nos poros dos agentes agressivos do ambiente marítimo (sobretudo iões de cloreto) por absorção e/ou difusão, num processo idêntico ao esquematizado na Figura 10. A este processo associa-se também um insuficiente ou inadequado recobrimento das armaduras, o qual potenciou o desenvolvimento da carbonatação e consequentemente corrosão das armaduras.

A solução para este problema passa, para além da intervenção corretiva, pelo recurso a sistemas de proteção do betão face à carbonatação, prevenindo novas avarias desta natureza.

Os sistemas atualmente existentes no mercado são produtos de películas superficiais (tintas)

e argamassas cimentícias modificadas (Simas, 2007). Estes produtos caracterizam-se por apresentarem elevados coeficientes de resistência à penetração, sobretudo pelo preenchimento dos poros superficiais.

Alguns estudos realizados sobre este assunto (Rodrigues, 1998; Serrano e Moreno, 2005; McGrath, 2005) revelam que de facto estes produtos podem ter um efeito benéfico contra a carbonatação. Qualquer barreira que se oponha à difusão do através da superfície tem como consequência a diminuição da velocidade de carbonatação. Quer se trate de sistemas de impregnação ou revestimento da superfície, a finalidade é a mesma para ambos: atuar como barreira física à penetração dos agentes agressivos.

Aplicar um polimento ou um acabamento especial à superfície conduz a uma densificação local do betão dificultando também a difusão do  $\text{CO}_2$ . São variadíssimos os sistemas de proteção face à carbonatação existentes atualmente, tais como pinturas, selantes e até mesmo aditivos adicionados à pasta fresca de betão, como se ilustra na Figura 37.

Os sistemas de proteção do betão podem ter uma função preventiva, aumentando o período de iniciação da corrosão, ou uma função corretiva, limitando a difusão do agente agressivo e, assim, diminuindo a taxa de corrosão.

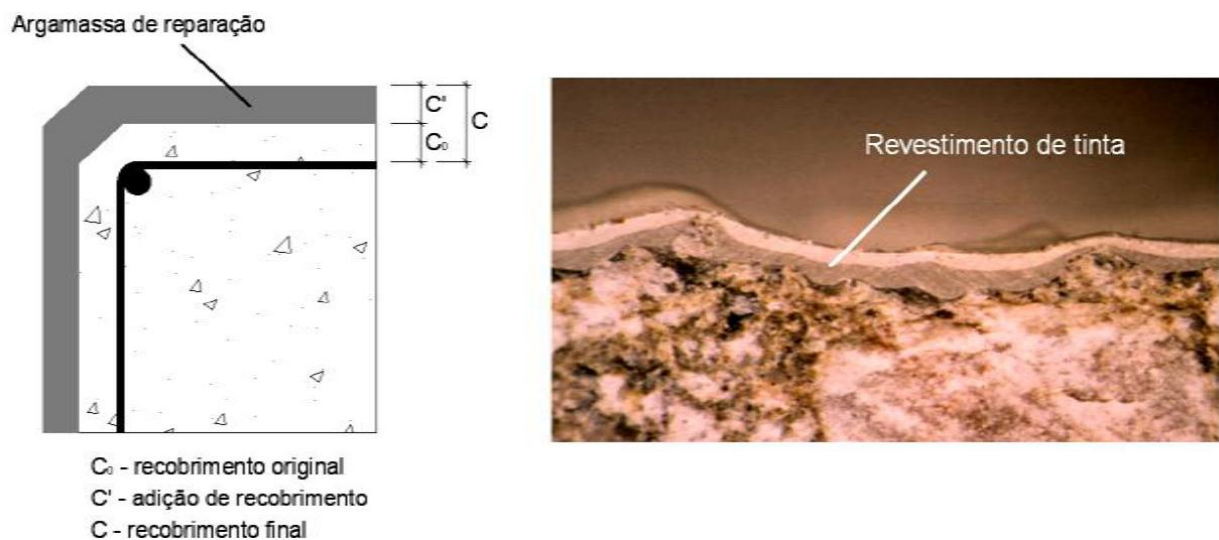


Figura 37. Sistemas de proteção a) à base de argamassa e b) com revestimento de tinta (Engelfried, 2000)

Assim, o betão pode ser protegido contra a carbonatação, quer por revestimentos protetores como tintas de emulsão de alta qualidade ou argamassas cimentícias modificadas com polímeros. A velocidade de carbonatação também pode ser diminuída pela incorporação no betão fresco de polímeros termoplásticos, formando uma película adequada para o efeito. Os do primeiro tipo são designados por sistemas superficiais de proteção e podem ser aplicados em estruturas novas como prevenção de corrosão das armaduras, ou em estruturas já existentes, nas quais o betão de recobrimento não assegura a resistência às condições ambientais de exposição.

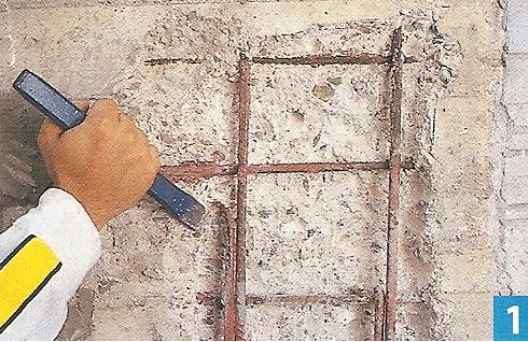
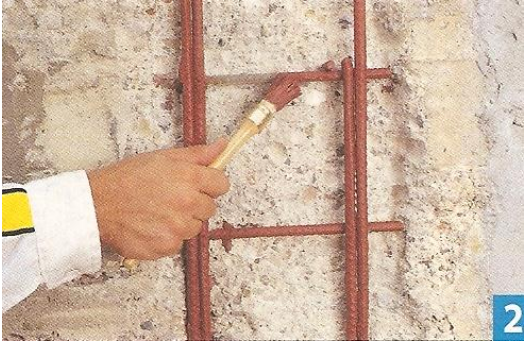



Poderão também ser usados no reforço e regularização de áreas reparadas ou em condições de serviço de agressividade elevada, como é o caso de estruturas em contacto com produtos químicos.

As condições ambientais e de serviço a que a estrutura está sujeita, determinam o nível de desempenho a exigir aos sistemas de proteção. Existe atualmente uma grande variedade de produtos disponíveis no mercado, com diferentes composições e características de proteção. Desta forma, torna-se essencial compreender que tão importante é a escolha do produto como a sua adequação às condições em que será empregue.

O principal agente responsável pela carbonatação do betão é como já visto, o dióxido de carbono, desempenhando a humidade também um papel muito importante. É a estes dois níveis que os sistemas de proteção devem atuar, impedindo e/ou dificultando o seu ingresso em profundidade.

Concretizando, os revestimentos superficiais são eficazes como barreira a longo prazo ao  $\text{CO}_2$ , sendo uma maneira eficiente de prevenir a carbonatação adicional a aplicação de uma camada superficial que realize uma barreira ao  $\text{CO}_2$ , como, por exemplo, uma argamassa cimentícia modificada com adições adequadas. Quer por razões estéticas, como por requererem uma determinada espessura para funcionar, estes sistemas são por vezes substituídos por revestimentos delgados, como tintas (Simas, 2007).

As etapas do processo adotado para tratamento de cada pilar danificado, num total de 14, encontram-se ilustradas na Figura 38 e são um padrão conhecido das marcas utilizadas.

- a)  1
- Sondar as superfícies para detetar zonas descoladas. Recortar as zonas a reparar, formando arestas retas. Picar a zona a reparar, eliminando materiais soltos e criando rugosidade na superfície. Descobrir as armaduras oxidadas e limpar a ferrugem por escovagem ou, de preferência, com jato de areia. Limpar todo o pó.
- b)  2
- Aplicar, com pincel, duas camadas espessas de weber.rep fer nas armaduras já limpas, procurando manchar o menos possível o betão. Após secagem do primário, humedecer abundantemente o betão e deixar absorver a água.
- c)  3
- Amassar weber. tec plus com cerca de 3 a 3,5 litros de água limpa por saco, e aplicar com colher, enchendo e compactando bem a zona a reparar, em camadas até 2 cm de espessura.
- d)  4
- Realizar o acabamento com a ajuda de uma talocha perforada. Efetuar cura húmida da superfície exposta, molhando frequentemente pelo menos 48 horas após a aplicação, para diminuir o risco de fissuração por retração durante o processo de presa.
- e)  5
- Aplicar uma tinta formulada com base em resinas acrílicas, com excelente resistência à exposição ambiental, aos alcalis e ao envelhecimento. A base deve apresentar-se seca, sólida e isenta de sujidade, gordura, restos de óleo de descofragem e partículas em desagregação.

**Figura 38. Etapas do processo de tratamento de cada pilar danificado: a) limpeza; b) aplicação de uma tinta de proteção das armaduras; c) e d) aplicação de uma argamassa de enchimento (Weber, 2012); e) aplicação do revestimento exterior (Sika, 2012)**

Assim, a primeira fase do tratamento consistiu na remoção do betão destacado e/ou danificado, na cuidada limpeza da ferrugem da armadura e eliminação de todo o pó, conforme descrito na Figura 38a.

Neste caso de estudo, foram utilizados os seguintes produtos de tratamento e reparação do betão e armaduras:

- Proteção das armaduras: **weber.rep fer**
- Argamassa de enchimento do betão: **weber.tec plus**
- Revestimento exterior dos pilares: **Sikagard® - 660 ES**

Foram aplicadas duas camadas do produto protetor das armaduras escolhido, de acordo com as instruções do fabricante (Figura 38b). O resultado desta fase de tratamento é visível na Figura 39.



**Figura 39. Processo de tratamento dos pilares: limpeza e proteção das armaduras**

Subsequentemente, as zonas tratadas foram recobertas com a argamassa de enchimento selecionada, preparada segundo as indicações do fabricante (Figura 38c e d). O aspeto final

após esta fase de tratamento é apresentado na Figura 40.



**Figura 40. Processo de tratamento dos pilares: recobrimento dos pilares com argamassa selecionada**

Por fim, todos os pilares foram protegidos através da pintura superficial com a tinta escolhida à base de resinas acrílicas, de modo a melhorar a superfície do betão, reduzir a

sua porosidade e aumentar a sua resistência à exposição ambiental, nomeadamente à carbonatação. O aspeto final dos pilares de betão armados após tratamento pode ser visto na Figura 41.



**Figura 41. Aspeto final dos pilares de betão armado tratados**

### **Sugestões de monitorização**

A hipotética causalidade atribuível à difusão de cloretos (nomeadamente cloreto de sódio próprio de atmosferas marítimas) não foi estudada, dada a intervenção corretiva ser, neste caso, semelhante à da carbonatação.

## Conclusões

A reabilitação de elementos de betão ou em argamassa hidráulica é um tema de grande relevância e atualidade, dado a degradação em que se encontram muitos edifícios e estruturas construídos apenas há algumas décadas (quando não se verificam em prazos ainda inferiores).

Ao longo deste trabalho, foram abordados os principais problemas que podem ocorrer em betão e, dada a sua semelhança, em argamassas hidráulicas, desde a sua identificação e enquadramento (a partir dos sintomas mais comuns), definição de soluções interventivas e sua monitorização.

Foram ainda apresentadas causas principais e mais prováveis destas avarias, bem como alguns dos meios de diagnóstico mais corrente.

Muito embora, e sobretudo, o âmago e fulcro deste trabalho foi a sistematização destas diversas avarias, de forma a:

- (i) Identificá-las;
- (ii) Descrevê-las;
- (iii) Catalogá-las dentro de características de danos e métodos interventivos correspondentes;
- (iv) Efetuar a exposição sumária desses métodos interventivos;
- (v) Indicar produtos comerciais existentes no mercado aplicáveis às soluções técnicas mencionadas.

Elaborando quadros de “problemas *versus* soluções” de acordo com a normalização em vigor (EN NP 1504), tendo em vista uma fácil e expedita consulta, que não sendo um compêndio de intervenção, dá algumas referenciais iniciais informativas sobre a mesma.

Na sequência das soluções, surge a preocupação verificativa das opções tomadas, pelo que deixaram algumas formas simples de o conseguir, considerando uma monitorização mínima posterior. Também aqui se privilegiou a apresentação da informação em tabelas de simples leitura.

Como corolário deste trabalho de recolha e compilação de informação, foi apresentado um caso prático, no qual se procurou resolver um problema específico em pilares de betão armado, tendo-se aplicado os conceitos, métodos e soluções anteriormente abordados.

Por último, em termos conclusivos, é de referir e salientar que, felizmente (por razões simplificativas e económicas) muitas das estratégias, métodos e materiais de reabilitação e reforço podem-se aplicar a diversos tipos de avarias, sendo estas últimas em número bem maior que as soluções necessárias e disponíveis.

## Bibliografia

- Aguiar, J. E. (2000). Patologias que comprometem a durabilidade do concreto em galerias de águas pluviais. In: *42º Congresso Brasileiro do Concreto - IBRACON*. Fortaleza (CE) - Agosto/2000, 15 pgs.
- Aguiar, J. E. (2006). *Avaliação dos ensaios de durabilidade do concreto armado a partir de estruturas duráveis*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Almeida, I. R. (2003). Influência da resistência à abrasão do agregado na resistência à abrasão de concretos de alto desempenho. In: *Congresso Brasileiro do Concreto – REIBRAC*, 42, 2000, Fortaleza. Anais. São Paulo: IBRACON, 2000.
- Andrade, C. e Alonso, C. (1996). Vida útil e vida residual das estruturas de hormigón. In: *Prevenção da Corrosão em Estruturas de Betão Armado*. Seminário LNEC, Lisboa.
- Andrade, J. J. O. (2003). Avaliação das características do concreto quando submetido à degradação de origem química. In: *Atas do Congresso Brasileiro do Concreto – REIBRAC*, 45, 2003, Vitória - ES. São Paulo: IBRACON, 2003.
- Andrade, Maria del Carmem (1992) *Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras*. Tradução e adaptação de Antônio Carmona e Paulo Helene. 1. ed. São Paulo: Pini. 104 p. ISBN 85-7266-011-9.
- Arêde, A. e Costa, A. (2002). Inspeção e Diagnóstico Estrutural de Construções Históricas: algumas contribuições da FEUP. In: *Seminário sobre “A Intervenção no Património. Práticas de Conservação e Reabilitação”*, FEUP-DGEMN, Porto.
- ASTM (1995). ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS, *Standard Practice for Ultrasonic Pulse-Echo Straight-Beam Examination by the Contact Method*. Vol. 03.03 Nondestructive Testing. West Conshohocken: ASTM E 114-95, 1995, 920 p., p.12-15.

- Barnard, J. L. (1967). *Corrosion of sewers*. Pretoria : C.S.I.R., National Building Research Institute.
- BASF (2012). *European Standard EN 1504*. 48 pgs. [www.basf.com](http://www.basf.com)
- Basheer, P. A. M., Basheer, L., Cleland, D. J. e Long, A. E. (1997). Surface treatments for concrete: assessment methods and reported performance. *Construction and Building Materials* 11 (7-8), 413-429.
- Bauer, R. J. F. et al (2002). Influência dos endurecedores de superfícies sobre a resistência ao desgaste por abrasão In: *Anais do Congresso Brasileiro do Concreto-REIBRAC*, 44, Belo Horizonte - MG. São Paulo: IBRACON.
- Bertolini, L. e Pedferri, P. (1995). *Tecnologia dei materiali. Leganti e calcestruzzo*. Città Studi Edizioni. Milão, Itália.
- Blight, G.E. (1991). The moisture condition in an exposed structure damaged by alkali-silica reaction. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 43, Nº 157, pp. 249-255.
- Carette, C.G. e Malhotra, V.M. (1983). Mechanical properties, durability and drying shrinkage of Portland cement concrete incorporating silica fume. *ASTM Journal of Cement, Concrete and Aggregates*, Vol. 5, Nº 1, pp 3-13.
- Catarino, J.M.R. (2010). *Normalização Europeia no âmbito da reparação*, LNEC, Lisboa.
- CEB (1992). *Durable concrete structures*. CEB, Thomas Telford.
- CEN - Comité Europeu de Normalização (2004). *EN 1504 - Proteção e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão*, Parte 1 a 10.
- Cody, R.D., Cody, A. M., Spry, P. G. e Gan, G. (1996). Experimental deterioration of highway concrete by chloride deicing salts. *Environment & Engineering Geoscience*. Vol. 2, Nº. 4. p. 575-588.
- Costa, A. (2011). *Reabilitação e Reforço de Estruturas: Corrosão do aço e deterioração do betão*. Apontamentos do Mestrado em Engenharia Civil. IST, Lisboa.
- Coutinho, A.S. e Gonçalves, A. (1994). *Fabrico e propriedades do betão*. Vol. III, 2ª ed., Lisboa: LNEC,1994.

- Coutinho, J.S. (1998). *Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Diamond, S. (1996). *Cement and concrete composites*. Proceedings, pp. 205-215, citado por Reis et al. (1999).
- Emmons, P.H. (1993). *Concrete Repair and Maintenance*. Kingston: R. S. Means Company, 295 p. ISBN 0-87629-286-4.
- Engelfried, R. (2000). *Über den Einfluß der Schichtdicke und der Alterung auf die Wirksamkeit von Oberflächenenschutzsystemen für Betonbauteile*, Dissertação, Dortmund, Alemanha.
- Evangelista, W.L. (2004). *Estudo da redistribuição de tensões em seções de pilares curtos de concreto armado com recuperação parcial*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia.
- Ferreira, R.M. (2000). *Avaliação dos ensaios de durabilidade do betão*. 246 pgs. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga.
- Figueiredo, E.P. (2005). Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.) *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: IBRACON. v. 2, cap. 27, p. 828-855. ISBN 85-98576-04-2.
- Finch, T. (1985). “Non-destructive testing in building services – A general introduction”, BSRIA-Building Services Research and Information Association, Technical Note TN 10/85, 22 p.
- Gonçalves, A. e Reis, M.O. (1999). *Sulphate attack of concrete*. LNEC, Lisboa.
- Green, H. (1964). Impact strength of concrete. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Vol. 28, pp. 383-396, citado por Neville (1995).
- Guerra Martins, J. (2011). *Betões: Elementos Gerais, Natureza e Qualidade*. Documento didático de apoio às aulas de Materiais de Construção I, Universidade Fernando Pessoa (4ª edição).

- Gutt, W.H. (1997); Chemical resistance of concrete. *Concrete*, 12, 35. Citado de Zoldners (1960).
- Hasparyk, N. P. (1999). *Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado – efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, Goiânia, 1999.
- Hasparyk, N. P., Lopes, A. N. M., Andrade, M.A.S.; Santos, S.B. (2005). Deformações por Retração e Fluência. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.) *Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações*. São Paulo: IBRACON, v. 1 cap. 22, p. 655-685. ISBN 85-98576-04-2.
- ICOMOS - Comité Científico Internacional para a Análise e Restauro de Estruturas do Património Arquitectónico (2003). *Recomendações para a análise, conservação e restauro estrutural do património arquitectónico*. Tradução de Lourenço, P. e Oliveira, D. 14<sup>a</sup> Assembleia Geral do ICOMOS em Victoria Falls, Zimbabué, Outubro 2003.
- Jâcome, C.C. e Guerra Martins, J. (2005). *Identificação e tratamento de patologias em edifícios*. Monografia, Universidade Fernando Pessoa. 1<sup>a</sup> edição, 2005.
- Kuperman, S.C. (2005). Concreto nas obras de barragens. *XXVI Seminário Nacional de Grandes Barragens*, Tema 96. Goiânia: CBDB.
- Landis, E., Peterson, E., Selleck, S., Shah, S., Li, Z., Zdunek, A., Prine, D. (2002). *Developments in NDE of Concrete*. Northwestern University Center for Advanced Cement-Based Materials e BIRL Industrial Research Laboratory.
- Liu, T. C. e McDonald, J. E.(1981). Abrasion-erosion resistance of fiber-reinforced concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*, Vol. 3, n. 2, p. 93-100.
- Lopes, B. (2011). *Protecção superficial do betão. Influência da base no comportamento de produtos de impregnação*. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. IST, Lisboa, 126 pp.
- Lorenzi, A; Caetano, L. F.; Drunn, M.T. e Silva Filho, L.C.P. (2003). Utilização de ultrassom para o monitoramento de estruturas de concreto. *Actas da Conferência PANNDT, 3<sup>a</sup> Conferência Pan-Americana sobre Ensaios não Destrutivos*, Rio de Janeiro, Brasil. 2 a 6 de Junho de 2003.

- Macchi, G. (2000). The role of experimental testing in the diagnosis of historical structures. *International seminar on evaluation of seismic risk and reduction of vulnerability of historical structures*. IUSS, Università degli Studi di Pavia, Pavia, Junho 2000.
- McGrath, P.F. (2005). A simple Test Chamber for Accelerated Carbonation Testing of Concrete, *Proceedings of ConMat'05 - 3rd Int Conf on Construction Materials*, Vancouver, BC.
- Malhotra, H.L. (1956). The effect of temperature on the compressive strength of concrete. *Magazine of Concrete Research*, 8.
- Mehta, P.K. e Monteiro, P.J.M. (1994). *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*. Tradução de Paulo Helene et al. 1. ed. São Paulo, PINI, 580p. ISBN 85-7266-040-2.
- Mendonça, L. V. (2005). Durabilidade de Estruturas de Betão Armado. Degradação do Betão e Corrosão de Armaduras. Importância da Inspeção Periódica. *Revista "Arte e Cimento"*, nº 37, Out. 2005, pp. 70-73.
- Montemor, M.F., Alves, J.H., Simões, A.M., Fernandes, J.C.S., Lourenço, Z., Costa, A.J.S., Appleton, A.J. e Ferreira, M.G.S. (2007). Sensor de cloretos para monitorização in-situ de estruturas de betão armado. *Corrosão e Protecção de Materiais*, Vol. 26 N.º 3, pp. 74-78.
- Moreira, N., Couto, J. P. e Couto, A. M. (2007). A reabilitação de estruturas de betão com argamassas de retracção controlada. *Congresso Nacional de Argamassas de Construção*, Vol. 2, Lisboa, Portugal. Disponível em [http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/9098/1/Paper%2055\\_07.pdf](http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/9098/1/Paper%2055_07.pdf)
- NBR 6118 (2003). *Projeto de estruturas de concreto – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2003.
- Nepomuceno, A. M. (1982). *Propriedades do concreto*. Tradução: Salvador E. Giammusso. 1. ed. São Paulo: Pini, 738 p.
- Neville, A.M. (1995). *Properties of concrete*. Longman, England, 844 pp.
- Neville, A.M. e Brooks, J.J. (1997). *Concrete technology*. Longman, England, 438 pp.

- NP ENV 206 (1993). *Betão. Comportamento, produção, colocação e critérios de conformidade*.
- Ollivier, J.P. e Baron, J. (1992). *La durabilité des bétons*. Presse Nationale des Ponts et Chaussées, 456 pp.
- Oz (2012). *Principais ensaios e técnicas para intervenções estruturais em construções recentes*. <http://www.oz-diagnostico.pt/pt/quadroII.swf>
- Papadakis, V.G. e Fardis, M.N. (1992). Effect of composition, environmental factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation. *Materials and Structures*, Vol. 25, N° 149, pp. 293-304.
- Penetron, (2008). <http://www.penetron.com/newsletter/jan09-po.htm>
- Pereira, E. A. (2010). *Patologias em reservatórios de água potável e sua correcção*. Dissertação submetida ao Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. ISEL, Lisboa.
- Pereira, V. e Guerra Martins, J. (2005). *Reabilitação: Materiais e Técnicas Tradicionais de Construção*. Disponível em <http://www2.ufp.pt/~jguerra/PDF/Reabilitacao/Materiais%20e%20Tecnicas%20Tradicionais%20de%20Construcao.pdf>
- Powers, T.C. (1955). *Basic considerations pertaining to freezing and thawing tests*. Proc. ASTM, 55, pp. 1132-1154.
- Reis, L. S. N. (2001). *Sobre a Recuperação e Reforço das Estruturas de Concreto Armado*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte (MG).
- Reis, M.O. e Silva, A.S. (1997). *Reacções álcalis-sílica: recomendações gerais para prevenir a deterioração do betão*. LNEC, Lisboa.
- Reis, M.O. e Silva, A.S. (1999). *Recomendações gerais para prevenir a deterioração do betão por reacção álcalis-sílica*. LNEC, Lisboa.
- Reis, M.O., Salta, M.M. e Silva, A.S. (1999) Degradation of reinforced concrete structures in oceanic environment. *Actas do COM48 LNEC*, Lisboa, 13pp.

- Rodrigues, M. P. (1998). *Durabilidade de revestimentos por pintura para protecção do betão armado*. Tese de Doutoramento em Engenharia Química, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Rossi, P.P. (1998). Inspection and monitoring for the restoration of historical buildings. *Curso de recuperação e valorização de edifícios e conjuntos históricos*. IST, Lisboa, Maio 1998.
- Salta, M. M. (1997). Introdução à corrosão do aço no betão. Modelo de comportamento às ações agressivas. *Seminário sobre Prevenção da corrosão em estruturas de betão armado*. Lisboa: LNEC,1997.
- Sarshar, R.; Khoury, G.A. (1993) Material and environmental factors influencing the compressive strength of unsealed cement paste and concrete at high temperatures. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 8.
- Serrano, I.D. e Moreno, E.I. (2005). Películas barrera: Una opción contra la carbonatación del concreto reforzado. *Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY*, 10-2, pp.37-45, ISSN: 165-529X.
- Shields, M. A., Leek, D. S., Lambert, P. (1992). “Coatings for the protection of structural materials”. *Construction, Maintenance and Repair*, pp. 2-9.
- Sika (2012). *Reparação e Protecção de betão com Sika ® de acordo com a Norma Europeia EN 1504*. Disponível em <http://prt.sika.com/dms/getdocument.get/bba75b93-afb4-3a12-9104-42191f38abdd/en1504.pdf>
- Silva, M.R. e Deloye, F.X. (1991). Dégradation biologique des bétons. *Bulletin Liaison*, LCPC, 176, Paris, pp. 87-91.
- Silva, P.A.S.C.M., (2008). Comportamento de Estruturas de Betão Reforçadas por Colagem Exterior de Sistemas de CFRP, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, DECivil, Porto.
- Silva, P.F.A. (1995). *Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana*. 1. ed. São Paulo: Pini. 152 p. ISBN 85-7266-043-7.

- Silva, T.J. (1998). *Predicción de la vida útil de forjados unidireccionales de hormigón mediante modelos matemáticos de deterioro*. 290 f. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil) – Escola técnica superior d'enginyers de Camins, Universidade Politècnica da Catalunya, Barcelona.
- Simas, M.S.L. (2007). *Sistemas de proteção do betão face à carbonatação*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico.
- Sousa, J.A.M. (2011). *Inspecção e reabilitação de estruturas segundo a NP EN 1504 – Caso de obra*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Junho de 2011.
- Swab, H.B. (1961). Effect of H<sub>2</sub>S on concrete structures. *Journal of Sanitation Engineering Division*, 1.
- Weber (2012). *O guia Weber*. [www.weber.pt](http://www.weber.pt)
- Wood, J.G. e Johnson, R.A. (1993). The appraisal and maintenance of structures with alkali-silica reaction. *The Structural Engineer*. Vol. 71, N° 2, pp. 19-23.
- Zoldners, N.G. (1960). *Effect of high temperature on concretes incorporating different aggregates*. Miswabnes Branch Res. Report R.64, Dept. Mines, Ottawa.