

RUBEN FILIPE CONTENTE ANDRÉ

**REPARAÇÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO
ARMADO AFETADO PELA CARBONATAÇÃO DO
BETÃO E CORROSÃO DAS ARMADURAS**

Orientador: José d'Assunção Teixeira Trigo

Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias

Faculdade de Engenharia

Lisboa

2013

RUBEN FILIPE CONTENTE ANDRÉ

**REPARAÇÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO
ARMADO AFETADO PELA CARBONATAÇÃO DO
BETÃO E CORROSÃO DAS ARMADURAS**

Dissertação apresentada para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil no Curso de Mestrado em Engenharia Civil na especialidade de Construção e Estruturas, conferido pela Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias.

Orientador: Prof. Eng.º José D`Assunção Teixeira Trigo

Co orientador: Prof. Eng.º João Leite Garcia

Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias

Faculdade de Engenharia

Lisboa

2013

Agradecimentos

Apresento desta forma o meu agradecimento ao Eng.º Teixeira Trigo e ao Eng.º João Garcia pela paciência demonstrada, pela orientação recebida e pelos conteúdos essenciais recebidos para a elaboração deste trabalho.

Quero também agradecer ao Eng.º António Domingues e à Eng.ª Cristina Lourenço, pelas opiniões dadas e pelos dados fornecidos nas obras visitadas.

Tenho também de agradecer à empresa onde laboro e aos meus colegas, que me deram tempo e apoio para me dedicar somente a este trabalho.

Quero agradecer ao meu Pai e à minha Mãe, pelos sábios conselhos que me foram dados ao longo deste trabalho e ao amor enorme que me foi transmitido.

Por fim, quero agradecer à Andreia que foi o meu pilar desde o início até ao fim desta dissertação, mesmo quando tudo parecia não ser possível, era quem me incentivava a não desistir, a ultrapassar esta etapa da minha vida. Quero também pedir desculpa por estes meses cansativos e repetitivos.

A todos, muito obrigado.

Resumo

A dissertação aqui apresentada pretende sintetizar as causas das deteriorações em edifícios correntes de betão armado e os princípios e métodos de proteção e reparação propostos pela NP EN 1504.

Apresenta-se em modo de nota histórica, a evolução do betão armado e do seu surgimento em Portugal, com referência a obras de betão armado aparente. Aborda-se também a durabilidade do betão armado e os cuidados a ter desde o fabrico do betão à sua cura em obra.

Aprofunda-se este trabalho com o desenvolvimento das diferentes causas de deterioração do betão armado, enfatizando as causas eletroquímicas onde se inclui nomeadamente a que tem origem na carbonatação no betão, seguindo-se a descrição dos métodos para concretizar cada princípio proposto na norma EN 1504.

Desenvolvem-se os cuidados a ter na escolha do método e na preparação do substrato anterior à intervenção propriamente dita.

Por fim são apresentados casos práticos de obras visitadas, reabilitadas com métodos normalizados aplicáveis a qualquer estrutura de betão armado.

O presente trabalho é ilustrado com fotografias, esquemas e quadros dos diferentes assuntos, com a intenção de uma melhor compreensão dos temas desenvolvidos.

Palavras-chave: Betão armado, carbonatação do betão, corrosão das armaduras, reparação, NP EN 1504.

Abstract

The dissertation here presented, is intended to summarize the causes of deterioration in current buildings of reinforced concrete and the principals and methods of protection and repair in NP EN 1504.

It's presented in order of an historical note, the evolution of reinforced concrete and the emergence of it in Portugal, with reference works of reinforced apparent concrete. It's also mentioned the durability of reinforced concrete and the cautions since the manufacturing stage to the cure.

This work develops the different causes of spoilage at reinforced concrete, emphasizing the electrochemical causes, in particular the one that starts carbonation in concrete, followed by the treatment methods to fill the principals of the NP EN 1504.

It's developed the precautions to take before choosing the method and the preparation of the practical intervention.

Finally it's presented the practical cases of visits, rehabilitated with standard methods that can be applied to any reinforced concrete structure.

This work it's illustrated by photographs, diagrams and tables, with the aim of a better understanding.

Keywords: Reinforced concrete, concrete carbonation, reinforcement corrosion, repair, NP EN 1504.

Abreviaturas e siglas

Fórmulas químicas

(CaCO_3) – Fórmula química Carbonato de cálcio;

[Ca(OH)_2] – Fórmula química Hidróxido de cálcio;

(CaSO_4) – Fórmula química Sulfato de cálcio;

(Cl^-) – Ião cloreto;

(CO_2) – Fórmula química Dióxido de carbono;

(e^-) – Eletrão;

(Fe^{2+}) – Ião ferroso;

[Fe(OH)_2] – Fórmula química Hidróxido de ferro;

(H^+) – Ião hidrogénio;

(H_2O) – Fórmula química Água;

(KOH) – Fórmula química Hidróxido de potássio

(MgSO_4) - Fórmula química Sulfato de magnésio;

(Na_2SO_4) – Fórmula química Sulfato de sódio;

(NaOH) - Fórmula química Hidróxido de sódio;

[$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$] – Fórmula química Sulfato de amónio;

(O_2) – Molécula de oxigénio;

(OH^-) – Ião hidroxilo.

Siglas

A/C – Relação água/cimento;

CP – Comboios de Portugal;

CTE – Condições técnicas especiais;

EDP – Energias de Portugal SA;

EN – Norma Europeia;

HR – Humidade relativa;

ISCTE-IUL – Instituto Superior de Ciências do Trabalho e da Empresa – Instituto
Universitário de Lisboa;

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil;

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia;

MASP – Museu de arte de São Paulo;

MR – Métodos de reparação;

NP – Norma Portuguesa;

pH – Potencial hidrogénio;

PVC – Policloreto de vinil;

RBLH – Regulamento de Betões de Ligantes Hidráulicos, 1989;

REBAP – Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado, 1983;

RSA – Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes, 1983.

Índice

Índice.....	VII
Índice de figuras.....	IX
Índice de esquemas	XII
Índice de quadros.....	XII
1. Introdução.....	1
1.1. Considerações iniciais	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Organização do trabalho	2
2. Betão armado – Nota histórica e evolutiva	5
2.1. Introdução do betão armado em Portugal	5
2.2. Obras de betão armado (aparente) em Portugal.....	7
2.2.2. Complexo do ISCTE – IUL	9
2.2.3. Igreja Nossa Senhora da Conceição - Olivais Sul	11
2.2.4. Edifício Atrium Saldanha – Lisboa	13
2.3. Obras de betão armado (aparente) no Estrangeiro.....	14
2.3.1. Museu de Arte de São Paulo - Lina Bo Bardi.....	14
2.3.2. Capela de <i>Notre-Dame du Haut</i> em <i>Ronchamp</i>	16
2.4. Cuidados gerais a ter no betão armado, desde o fabrico do betão à sua colocação e cura em obra.....	18
2.5. Durabilidade do betão armado.....	22
3. Causas e manifestações dos defeitos principais que se repetem no betão armado .	25
3.1. Introdução	25
3.2. Causas de origem humana	26
3.3. Causas de origem física	28
3.3.1. Ciclos de gelo-degelo	28
3.3.2. Retração do betão	29
3.3.3. Ações térmicas.....	30
3.3.4. Erosão	31

3.3.5.	Cristalização de sais.....	32
3.3.6.	Utilização/Desgaste	32
3.3.7.	Fogo	32
3.4.	Causas de origem química	33
3.4.1.	Reações álcalis - agregado.....	34
3.4.2.	Agentes agressivos.....	34
3.4.3.	Ações de origem biológica	36
3.5.	Causas de origem mecânica.....	37
3.6.	Causas eletroquímicas	38
3.6.1.	Carbonatação do betão.....	41
3.6.2.	Contaminantes agressivos.....	44
3.6.3.	Correntes parasitas.....	47
3.7.	Resumo das causas e sintomas referidos	48
4.	Patologias das estruturas de betão armado (segundo a NP EN 1504).....	49
4.1.	Perceção dos defeitos das estruturas no local e do seu estado de deterioração – inspeção da estrutura.....	49
4.2.	Escolha dos métodos de reparação e proteção de estruturas de betão armado	55
4.3.	Trabalhos preparatórios a adotar antes da aplicação do método escolhido	61
5.	Reparação de betão armado afetado pela corrosão das armaduras induzida pela carbonatação do betão	67
5.1.	Proteção superficial da estrutura contra a carbonatação do betão	67
5.1.1.	Impregnação	68
5.1.2.	Revestimentos.....	69
5.1.3.	Membranas	70
5.1.4.	Novas camadas de recobrimento	71
5.1.5.	Proteção exterior.....	72
5.2.	Reparação e prevenção de betão deteriorado por carbonatação	73
5.2.1.	Reparação por utilização de argamassas.....	73
5.2.2.	Prevenção por tratamento de fissuras e fendas	74

5.3.	Prevenção de corrosão eletroquímica das armaduras	76
5.3.1.	Prevenção por revestimento das armaduras	77
5.3.2.	Prevenção por inibidores de corrosão	77
5.3.3.	Prevenção por proteção catódica	78
5.3.4.	Prevenção por monitorização	78
5.4.	Tratamento de betão contaminado por processo eletroquímico	79
6.	Exemplos de obras de betão armado deteriorado com exemplos práticos dos métodos intervencionados	83
6.1.1.	Laje de um edifício situado na Rua de São Bento, em Lisboa	83
6.1.2.	Igreja de N.S. Fátima, em Lisboa	87
6.1.3.	Escola José Gomes Ferreira, em Benfica.....	92
7.	Conclusão.....	111
	Bibliografia.....	113
	Anexo I – Ficha técnica referente ao caso prático da laje situada na Rua de S.Bento.....	I
	Anexo II – Referente ao caso prático da Igreja Nossa Senhora de Fátima	II
	Anexo III – Fichas técnicas referentes ao caso prático da Escola José Gomes Ferreira, em Benfica.....	III

Índice de figuras

Figura 1 – Fundação Calouste Gulbenkian, 2013.....	8
Figura 2 – Ataque biológico na superfície de betão aparente do edifício Gulbenkian, 2013 ..	9
Figura 3 – Destacamento do betão no edifício Gulbenkian, 2013	9
Figura 4 – ISCTE, Vista geral, 2013	10
Figura 5 – ISCTE, Corrosão das armaduras, 2013	11
Figura 6 – ISCTE, Descasque e delaminação do betão, 2013	11
Figura 7 – Igreja de Nossa Senhora da Conceição, Olivais Sul, 2013.....	12
Figura 8 – Igreja dos Olivais, corrosão das armaduras com destacamento do betão, 2013...	12
Figura 9 – Igreja dos Olivais, eflorescências devidas à carbonatação na superfície do betão, 2013.....	13
Figura 10 – Atrium Saldanha, 2010.....	13

Figura 11 – MASP; http://www.guiametro.com.br/	15
Figura 12 – MASP, piso subterrâneo; http://pt.wikipedia.org	16
Figura 13 – Capela de Ronchamp; http://www.archdaily.com.br/	17
Figura 14 – Capela de Ronchamp; http://www.archdaily.com.br/	17
Figura 15 – Fendilhação devida a ciclos gelo-degelo; www.ehow.com.br	29
Figura 16 – Fendilhação devida à retração do betão; http://www.engenhariacivil.com	30
Figura 17 – Fendilhação devida à ação térmica; emconstrucao10.blogspot.com	30
Figura 18 – Desgaste provocado pela abrasão; http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422009000400016&script=sci_arttext	31
Figura 19 – Deterioração pela ação do fogo; noticias.uol.com.br	33
Figura 20 – Fendilhação tipo teia de aranha; pt.dreamstime.com	34
Figura 21 – Corrosão por ataque de sulfatos; www.arqhys.com	35
Figura 22 – Ataque biológico; www.electramag.com.br	36
Figura 23 – Corrosão das armaduras; http://amigonerd.net	40
Figura 24 – Delaminação do betão por corrosão das armaduras	41
Figura 25 – Profundidade da carbonatação com recurso à fenolftaleína;	44
Figura 26 – Manchas de ferrugem, fissuração alinhada com a armadura e delaminação do betão; http://amigonerd.net	46
Figura 27 – Transporte de cloretos exteriores à estrutura de betão (Costa, 2011)	47
Figura 28 – Medição do recobrimento recorrendo ao pacómetro (LNEG, 2012)	51
Figura 29 – Frente de carbonatação recorrendo à fenolftaleína (LNEG, 2012)	51
Figura 30 – Aplicação de jato de água para limpeza do betão; cidadesaopaulo.olx.com.br ..	62
Figura 31 – Martelo de agulhas para criar rugosidade no betão; www.perfectool.pt	62
Figura 32 – Remoção de betão por corte; construironline.dashofer.pt	64
Figura 33 – Remoção de betão por esmagamento; construironline.dashofer.pt	64
Figura 34 – Escovagem mecânica; construironline.dashofer.pt	65
Figura 35 – Método de impregnação simples (NP EN 1504-2, 2005)	69
Figura 36 – Método de revestimento por pintura (NP EN 1504-2, 2005)	70
Figura 37 – Método de aplicação de membrana asfáltica	71
Figura 38 – Método de aplicação de microbetão; cm-viseu.pt	72
Figura 39 – Aplicação de painéis de betão prefabricado; www.farcimar.pt	73
Figura 40 – Injeção de fissuras em laje; http://mundodaimpermeabilizacao.blogspot.pt/	75
Figura 41 – Aplicação de malha de aço (ânodo) e argamassa de cimento na realcalinização do betão; www.stap.pt	81
Figura 42 – Processo de realcalinização do betão; construironline.dashofer.pt	81
Figura 43 – Laje com corrosão de armaduras e delaminação do betão, 2013	84

Figura 44 – Laje deteriorada por acumulação de humidade na zona da conduta de ar condicionado, 2013.....	84
Figura 45 – Limpeza a jato de alta pressão nas zonas delaminadas, 2013	85
Figura 46 – Fissuração presente nas fachadas, 2013	88
Figura 47 – Ensaio de fenolftaleína em obra, 2013	89
Figura 48 – Ensaio de fenolftaleína em várias partes da fachada ‘Alçado Sul Galeria’, 2013	89
Figura 49 – Pontos de corrosão de armaduras, 2013	90
Figura 50 – Reparação de fissuras em painéis de fachada, 2013.....	90
Figura 51 – Aplicação de argamassa cimentícia e rede de fibra de vidro em fachada, 2013.	92
Figura 52 – Escola José Gomes Ferreira, 2003.....	93
Figura 53 – Aspeto geral das fachadas dos módulos; painéis exteriores, 1975-1980.....	94
Figura 54 – Peças semicirculares na cobertura betonadas em obra, 1975-1980.....	94
Figura 55 – Carotes extraídas dos alçados dos vários módulos com recurso à fenolftaleína, 2004	97
Figura 56 – Destacamento do betão e corrosão de armaduras nas fachadas, 2003.....	98
Figura 57 – Aplicação do revestimento de proteção nas fachadas, 2004.....	100
Figura 58 – Aplicação de argamassa de reparação, 2004	101
Figura 59 – Descasque da pintura na fachada sul do módulo ‘A’ , 2013	102
Figura 60 – Fissura na fachada nascente do módulo ‘A’ , 2013.....	103
Figura 61 – Descasque da pintura e fissura reincidente na fachada nascente do módulo ‘B’ , 2013	104
Figura 62 – Presença de fissuras e envelhecimento da junta de dilatação do módulo ‘C’ , 2013	105
Figura 63 – Presença de eflorescências e descasque de pintura no módulo ‘C’ , 2013	105
Figura 64 – Pontos de corrosão e descasque de pintura nas escadas interiores do módulo ‘C’ , 2013	106
Figura 65 – Peças semicirculares na cobertura do módulo ‘C’ , 2013.....	106
Figura 66 – Fissuração superficial e perceção das áreas de intervenção em 2004 ‘D’ , 2013	107
Figura 67 – Fissura reincidente e risco de delaminação do betão no módulo ‘D’ , 2013	108
Figura 68 e 69 – Fissuras nos elementos verticais das janelas no módulo ‘E’ , 2013	109
Figura 70 – Fissuras horizontais e manchas nos elementos verticais de fachada no módulo ‘E’ , 2013	109

Índice de esquemas

Esquema 1 - Etapas na produção e colocação do betão	22
Esquema 2 - Esquema demonstrativo da corrosão	40
Esquema 3 - Valores da carbonatação em função da HR do ambiente (Simas, 2007)	42
Esquema 4 - Ciclo de regras a seguir antes da escolha do método (Souza & Ripper, 1998).	54
Esquema 5- Métodos de proteção superficial do betão	68
Esquema 6 - Métodos de injeção de fissuras	76
Esquema 7 - Soluções eletrolíticas: custos e aplicações (Appleton & Costa, 2012)	82

Índice de quadros

Quadro 1 - Falhas humanas na construção (Souza & Ripper, 1998)	27
Quadro 2 - Quadro resumo das relações entre causas e sintomas.....	48
Quadro 3 - Correspondência dos métodos às diversas causas e sintomas existentes.....	60

1. Introdução

1.1. Considerações iniciais

O betão armado é utilizado na construção de edifícios correntes desde o fim de 1890/inícios de 1900, e era considerado um material duradouro ou até eterno, desde que se seguissem certas metodologias e certos cuidados da boa prática da construção.

Com o evoluir do tempo, surgiram deteriorações nas estruturas de betão armado que suscitaram questões sobre a sua durabilidade. Era um material que resultava de certas características que quando em contacto com o meio envolvente ou pelo seu envelhecimento, se deteriorava e perdia a capacidade estrutural e estética.

Foram publicadas regulamentações que alertavam para a necessidade de se ter em conta o tipo de cimento a escolher, a relação A/C e bem assim, de se cumprir com o recobrimento adequado das armaduras; sobretudo começaram-se a ter em consideração as condições de exposição ambiental, para se aumentar a durabilidade do betão armado.

Com a necessidade de manter a durabilidade de uma estrutura de betão armado, regulamentos foram elaborados, até que surgiu a NP EN 1504 *‘Produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão armado’*, o que justificou que se passasse a dedicar mais atenção às causas de deterioração existentes em estruturas de betão armado e aos métodos de reparação/prevenção adequados.

Com este trabalho pretende-se esclarecer as dúvidas que surgem em casos diversos de deterioração de estruturas de betão armado em edifícios correntes, nomeadamente no combate à carbonatação do betão. Perante certas causas de deterioração e de metodologias de reparação e proteção destas superfícies, o objetivo é explicar de uma forma sintetizada a aplicação dos métodos de reparação e prevenção, assim como dar a conhecer as soluções de intervenção.

1.2. Objetivos

Os objetivos deste trabalho são os seguintes:

- Estudar e aprofundar os conhecimentos presentes na área de reparação e prevenção de estruturas de betão armado afetadas pela corrosão de armaduras induzida por carbonatação, em edifícios correntes inseridos particularmente em meios urbanos;
- Identificar as causas e sintomas da deterioração das estruturas de betão armado;
- Identificar os métodos existentes de reparação e prevenção da corrosão de armaduras, nomeadamente quando induzidas pela carbonatação do betão;
- Estudar e aprofundar a NP EN 1504;
- Identificar soluções de reparação menos conhecidas no âmbito da engenharia civil;
- Sintetizar fontes bibliográficas sobre soluções já estudadas na área da reparação de edifícios de betão armado afetados pela corrosão das armaduras induzida por carbonatação;
- Apresentar casos correntes de proteção e/ou reparação de corrosão de armaduras induzida por carbonatação, em estruturas de betão armado.

1.3. Organização do trabalho

Este trabalho encontra-se organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1. Introdução: descreve de forma sintetizada o tema deste trabalho, os seus objetivos e a organização do documento.
- Capítulo 2. Betão armado – Nota histórica e evolutiva: evolução do betão armado no nosso País, cuidados a ter nas etapas de fabrico e colocação do betão e também a sua durabilidade.
- Capítulo 3. Causas e manifestações recorrentes no betão armado: descreve as causas deterioradoras do betão e corrosão das armaduras.
- Capítulo 4. Patologias das estruturas de betão armado: identifica os métodos e os princípios da NP EN1504, as deteriorações em causa, a escolha do método de reparação adequado e os fatores a considerar antes da aplicação prática.

- Capítulo 5. Técnicas de prevenção e reparação de betão armado afetado por corrosão das armaduras – Carbonatação do betão: identifica algumas das técnicas de reparação, prevenção e tratamento do betão armado contra a corrosão das armaduras, pela carbonatação do betão; apresenta casos correntes intervencionados por essas técnicas.
- Capítulo 6. Exemplos de obras de betão armado deteriorado com exemplos práticos dos métodos intervencionados – Apresentação de exemplos de intervenções em obras deterioradas, visitadas pelo autor, com recurso aos métodos abordados nos capítulos anteriores.
- Capítulo 7. Conclusão: apresenta as conclusões retiradas da elaboração deste trabalho, assim como sugestões de temas para desenvolvimentos futuros.

2. Betão armado – Nota histórica e evolutiva

2.1. Introdução do betão armado em Portugal

O betão, com origem remota na Grécia e atualmente tão conhecido no seio da construção civil, é um material obtido a partir da mistura de agregados de pedra e areia, com ligante hidráulico, água e possivelmente adições.

A utilização moderna do betão começou com um pequeno impulso, em seguimento da aparição do cimento Portland em 1812. A invenção de um barco de betão armado em 1848, por Joseph-Louis Lambot, veio dar o ímpeto mais importante para a utilização deste material. O betão armado iniciou o seu pleno desenvolvimento a partir de 1890, com as aplicações que hoje se conhecem, graças às construções de François Hennebique.

Todos estes sucessivos acontecimentos vieram converter o betão e o betão armado, como pontos marcantes na História, com a sua utilização como material de construção no século XX.

Em Portugal, o betão armado considerado inicialmente um material grosseiro, distinguiu-se na aceitação generalizada por projetistas e construtores. Assim, um material sem tradição de uso e de pouca influência, começou a ser empregue em obras consideradas representativas como pontes, fábricas e silos.

Um exemplo de construção de uma das primeiras obras de betão armado, foi um edifício da Moagem de Trigo, no Caramujo, em 1898, segundo projeto de Hennebique, quatro anos depois do surgimento da 1ª fábrica de Cimento “Cimpor”, na qual começou a produção do cimento Portland no nosso País (Toscano, 2012).

Podem-se salientar alguns dos pontos mais importantes da evolução do betão armado no nosso País, os quais contribuíram para a sua aplicação diversificada (Coutinho, 1973):

- Em 1910 são construídas por representantes de Hennebique, dezenas de obras de edifícios diversos, como de habitação, indústria, armazéns, pontes e reservatórios;
- Em 1911 executa-se o anteprojecto de uma cocheira para abrigo de carruagens em Campolide, com cobertura de betão armado;
- Em 1912 constrói-se o primeiro depósito de água de betão armado e um ano depois, pontes e passagens superiores, construídas em betão armado pela C.P;

- No ano de 1918, são publicadas as Instruções para o emprego do *Betón Armado*, as quais constituem assim um primeiro regulamento;
- Em 1926 realça-se a construção das cúpulas do santuário de Santa Luzia, em Viana do Castelo, e a execução do novo edifício para recolha de carruagens na estação de caminho-de-ferro de Campolide;
- No ano de 1935 publica-se um Regulamento Português do Betão Armado;
- Em 1943 publica-se uma atualização do regulamento anterior e em 1960 outra atualização ao mesmo regulamento;
- No ano de 1967 surge o novo Regulamento de Estruturas de Betão Armado, substituindo o regulamento de 1935;
- Em Agosto de 1967 e Junho de 1968 vieram atualizações do regulamento de 1967;
- Em 1971 surge o Regulamento de Betões de Ligantes Hidráulicos - RBLH;
- Em 1983 surge o REBAP que atualiza os regulamentos anteriores e predomina até aos dias de hoje (Viseu, 1993);
- A partir dos meados do século XX, inicia-se o período mais importante das realizações de betão armado, com a construção da Ponte da Arrábida – 1963; Pavilhão Desportivo do Porto (Atual Pavilhão Rosa Mota) – 1955; Naves da Siderurgia Nacional no Seixal – 1961; Chaminés da EDP, em Sines e Setúbal; Ponte de São João, em betão armado com pré-esforço – 1991; Centro Cultural de Belém (1992) e o edifício da Caixa Geral de Depósitos – 1993 (Viseu, 1993).

Após esta evolução gradual do betão armado, em Portugal, constata-se que todas as construções executadas até aos dias de hoje envelhecem e estão expostas a graus de deterioração interna e externa, difíceis de contornar. As deteriorações são alvo de reparações, com recurso a métodos usados para recuperar a estrutura em si, tanto a nível estético como ao nível do seu desempenho estrutural.

Muitas destas construções são assinaláveis, por evidenciarem a evolução do betão armado revestido para betão armado aparente, tais como a Biblioteca e Museu Calouste Gulbenkian em Lisboa, o ISCTE-IUL em Lisboa, a Igreja da Nossa Senhora da Conceição nos Olivais Sul e o Edifício Atrium Saldanha em Lisboa visitados pelo autor. Registam-se também as obras do Museu de arte de São Paulo, no Brasil, e da capela de Notre-Dame du Haut, em *Ronchamp*, que demonstram a utilização do betão armado aparente em projetos de

alta complexidade, assim como a história que contam, devido ao envolvimento de arquitetos modernos que defendiam a arquitetura brutalista como ‘Lina Bo Bardi’ e ‘Le Corbusier’, que privilegiava a verdade estrutural das edificações e conseguiram concretizar obras de betão armado aparente.

No próximo ponto, apresenta-se um breve resumo da história e do estado atual de cada um dos edifícios atrás referidos. Antes de se avançar para a particularização de cada obra, vale a pena referir que a evolução do betão armado aparente teve a sua primeira aparição em Portugal em 1888, na reconstrução da casa dos castelos no Bom Jesus de Braga. Só por volta dos anos quarenta a cinquenta surgiram as primeiras experiências de betão à vista, como um elemento que entra na arquitetura dos edifícios e que foi ganhando aceitação mais expressiva com o tempo.

O betão armado aparente é um material que detém uma sensibilidade e uma notável capacidade de resposta à tecnologia, o que fundamenta este tipo de execução. Os anos sessenta assistem a uma maior e crescente recetividade dos projetistas à solução do betão armado aparente, como interveniente vitalizador do espaço arquitetónico. Têm-se exemplos em obras de Álvaro Siza Vieira, como a cooperativa de Lordelo e a piscina de Leça da Palmeira, assim como em obras de outros importantes arquitetos como Teotónio Pereira, Alberto Pessoa e Conceição Silva (Ferreira, 1972). Na opinião do autor, o betão aparente foi escolha comum por vários sectores da arquitetura, como a religiosa, hoteleira, industrial e escolar, tal como se observa nos exemplos atuais e atrás referidos.

Em conclusão desta nota histórica, pode-se afirmar que o betão passou por uma época de rejeição inicial, acabando por atingir um período áureo, com o reconhecimento de que é um material com uma notável capacidade estrutural capaz de atender às necessidades definidas em projeto.

2.2. Obras de betão armado (aparente) em Portugal

2.2.1. Sede e Museu Calouste Gulbenkian – Lisboa

No final da década de 50, mais propriamente no ano de 1959, começou a nascer em Lisboa, na Avenida de Berna, a Sede e Museu da Fundação Calouste Gulbenkian, segundo projeto dos arquitetos José Cid, Alberto José Pessoa e Ruy Jervis d’Athouguaia, auxiliados por uma equipa de especialistas e liderada pelo Eng. Guimarães Lobato. Inaugurados há 45 anos,

os edifícios, após a sua construção, provaram que a arquitetura tinha atingido a sua afirmação moderna e o betão um segundo ciclo de vida.

Foram realmente utilizadas as técnicas mais modernas do momento, designadamente na execução do betão armado pré-esforçado e até prefabricado. O edifício distribui-se por diversos pisos numa área total de 64 000 m², um número que representa a complexidade desta obra.

A expressão deste edifício no centro de Lisboa, dotado de uma estrutura forte sem revestimento do betão armado, faz com que o betão deixado aparente exponha em toda a sua força, a veracidade estrutural da edificação (Tostões, 2004). Esta afirmação mostra toda a contemplação existente em volta desta obra imponente.



Figura 1 – Fundação Calouste Gulbenkian, 2013

No ano de 2001 iniciou-se o processo de renovação dos espaços, tendo sido intervencionados os seguintes:

- Espaços administrativos da sede;
- Cafetaria e restaurante do 3º piso;
- Serviços médicos;
- Arquivo central;
- Zona de congressos – Auditórios 2 e 3, Salas 1, 2, 3 e 4;
- Galerias de exposições da sede;
- *Hall* da receção e livraria da sede;
- Museu e espaços adjacentes, galeria de exposições, loja e cafetaria (Lisbon Eco-Friendly fórum, 16/04/2010).

Em suma, pode-se afirmar que de um modo geral, os edifícios referidos estão bem conservados aceitando bem as suas recentes renovações; alguns dos problemas recentes de deterioração pontuais nos edifícios da Sede e Museu Gulbenkian, são os ataques biológicos no betão e destacamento no betão, que são visíveis na figura 2 e 3.



Figura 2 – Ataque biológico na superfície de betão aparente do edifício Gulbenkian, 2013



Figura 3 – Destacamento e eflorescências do betão no edifício Gulbenkian, 2013

2.2.2. Complexo do ISCTE – IUL

Este instituto situado na Avenida das Forças Armadas em Lisboa, foi fundado em 1972, sendo declarado instituto universitário autónomo em 1974. Desde então e até aos dias

de hoje, tornou-se uma unidade de referência arquitetónica na cidade de Lisboa, ao nível de uma excecional construção de betão armado, tanto para as pessoas que por ele passam, como para as que o frequentam. É de fácil perceção o betão armado aparente branco em todo o complexo, desde o ISCTE II à Ala Autónoma.

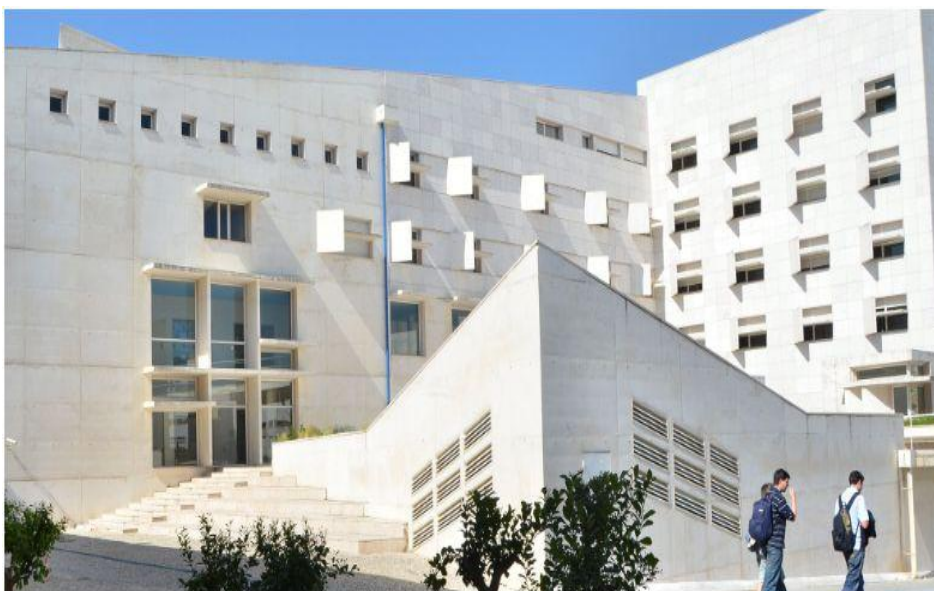


Figura 4 – ISCTE, Vista geral, 2013

O ISCTE I, datado de 1976/78, é essencialmente caracterizado pela sua planta quadrangular com um espaço central descoberto, onde as alas do edifício se apoiam numa estrutura pontual de betão, revestido com painéis do mesmo material, com os seus corpos de canto e paredes de betão armado aparente de cimento normal, moldadas no local como base. A Ala Autónoma, de betão branco estrutural, datada dos anos 90, acompanha toda a sua complexidade com o uso integral de paredes nesse material.

O ISCTE II, datado do ano 2000, com a sua forma construtiva baseada na utilização de betão branco aparente interior e parte do exterior, é sinónimo do domínio do uso do betão branco estrutural com imponente presença no conjunto do complexo.

Após esta pequena descrição das edificações do conjunto, conclui-se que este último edifício, o ISCTE II, veio permitir a consolidação, ao fim de cerca de 25 anos, dum espaço central que é raro existir nas áreas universitárias do nosso país (Ferreira, 2006).

Tal como no edifício anterior, este também sofre de deteriorações naturais que vão surgindo ao longo do tempo, nomeadamente no exterior, devido às intempéries.

Defeitos como corrosão das armaduras, descasque e delaminação do betão, verificam-se nas figuras 5 e 6.



Figura 5 – ISCTE, Corrosão das armaduras, 2013



Figura 6 – ISCTE, Descasque e delaminação do betão, 2013

2.2.3. Igreja Nossa Senhora da Conceição - Olivais Sul

Esta Igreja, situada na rua Cidade de Nampula, com data de projeto e construção de 1976-88, da autoria do Arq. Pedro Vieira de Almeida, situa-se em Lisboa e serve uma das paróquias da freguesia de Santa Maria dos Olivais, que se distingue por ser uma construção interessante de betão armado aparente interior e exterior. O motivo pelo qual se menciona esta obra é o de comparar o seu estado de deterioração com o bom estado atual das outras obras referidas neste ponto.



Figura 7 – Igreja de Nossa Senhora da Conceição, Olivais Sul, 2013

Muitas incongruências vieram ampliar alguns dos defeitos que acabariam por surgir, devidos às intempéries e à má execução. A existência de sucessivas empreitadas no decorrer da construção desta obra, correlacionadas com causas¹ humanas, químicas e eletroquímicas, originaram a carbonatação de betão e grandes corrosões das armaduras com posterior destacamento do betão. Pode-se ver todos os defeitos nas figuras 8 e 9. Trata-se de uma obra que nunca teve reparações do betão.



Figura 8 – Igreja dos Olivais, corrosão das armaduras com destacamento do betão, 2013

¹ Causas apresentadas no capítulo 3



Figura 9 – Igreja dos Olivais, eflorescências devidas à carbonatação na superfície do betão, 2013

2.2.4. Edifício Atrium Saldanha – Lisboa

O edifício Atrium Saldanha, localizado na praça Duque de Saldanha em Lisboa, foi inaugurado a 3 de Março 1998, com o projeto de arquitetura dos Arq. Ricardo Bofill e Arq. João Paciência. É um símbolo do rejuvenescimento da capital lisboeta e mereceu já a atribuição de importantes prémios, como o ‘Prémio Secil de Engenharia Civil 1999’.



Figura 10 – Atrium Saldanha, 2010

Uma construção de betão armado com uma área total de 66.000 m², distribuídos por 18 pisos em que 6 são cave, teve todos os cuidados e reservas especiais relativamente aos métodos utilizados. Para se ter uma noção da sua dimensão, refere-se a quantidade de material usada nesta obra:

- Aproximadamente 33.000 m³ de betão e 4.500.000 kg de aço, utilizados em fundações, paredes, núcleos, pilares, lajes e vigas (Prémio Secil de Engenharia Civil, 1999).

A maior parte dos elementos estruturais de betão armado não possui qualquer tipo de revestimento, sendo por isso outro caso de betão aparente estrutural. Todas as condições foram criadas para que este betão arquitetónico fosse de uma qualidade de acabamento excecional, o que veio a verificar-se.

A estrutura foi estudada para garantir um elevado nível de comportamento sísmico. As verificações de segurança foram baseadas na regulamentação então em vigor, tal como RSA e REBAP.

Em síntese, toda esta obra foi executada e fiscalizada, com os cuidados inerentes ao valor estrutural e estéticos inicialmente definidos. A ação das intempéries na deterioração da estrutura, foi prevenida e controlada; muito devido à construção cuidada e fiscalização efetuada, pois do que se tem conhecimento, ainda não se tornou necessária nenhuma intervenção de reparação até à data.

2.3. Obras de betão armado (aparente) no Estrangeiro

2.3.1. Museu de Arte de São Paulo - Lina Bo Bardi

O Museu de São Paulo foi fundado em 1947, idealizado pelo jornalista Assis Chateaubriand e por Pietro Maria Bardi. O prédio foi desenhado por Lina Bo Bardi e só foi inaugurado em 1968; o evento contou com a presença da rainha Elizabeth II da Inglaterra.

É um símbolo da cidade e é das principais obras de arquitetura modernista no País. O edifício foi construído num terreno junto à avenida Paulista, uma das mais importantes do município de São Paulo.

A principal responsável por este projeto foi a arquiteta Lina Bo Bardi, que nasceu em Roma em 1915 e faleceu em São Paulo em 1992; Formou-se em 1939 pela faculdade de

arquitetura de Roma, casou com o crítico Pietro Maria Bardi e partiu para o Brasil, onde potencializou as suas ideias de arquitetura moderna (Grinover, 2010).



Figura 11 – MASP; <http://www.guiametro.com.br/>

O doador do terreno, o Engenheiro Joaquim Eugénio de Lima, construtor da avenida Paulista, comprometeu-se naquela altura a que jamais se construiria ali uma obra que prejudicasse a caracterização da avenida e para isso, o projeto incumbia uma edificação subterrânea ou uma suspensa.

A arquiteta Lina Bo Bardi e o engenheiro José Carlos Ferraz optaram por ambas as soluções, concebendo um bloco subterrâneo e um elevado, suspenso a 8 metros do nível exterior, através de quatro pilares interligados por duas enormes vigas de betão aparente. Sob eles, encontrava-se o que foi considerado uma ousadia para aquela época: o maior vão-livre com 51m de comprimento e extensão total de 74 metros entre os apoios, confirmando o desenvolvimento do betão armado aparente no Brasil (Museu de Arte de São Paulo, 2013).

No edifício, de aproximadamente 10.000 metros quadrados, há, além dos espaços expositivos e da biblioteca, uma galeria de fotos, uma galeria de filmes e vídeos, dois auditórios, um restaurante, uma loja, várias oficinas, um *atelier* e espaços administrativos.

O acabamento é todo em betão armado aparente, pintado, com vidros temperados. Em 2003, o edifício foi galardoado pelo Instituto do Património Histórico e Artístico Nacional do Brasil.



Figura 12 – MASP, piso subterrâneo; <http://pt.wikipedia.org>

Entre 1996 e 2001, a administração do museu realizou uma ampla e polémica reforma. Realizaram-se obras de reabilitação nas vigas de sustentação, recuperação estrutural e impermeabilização da cobertura, intervenções imprescindíveis para se evitar a carbonatação do betão e corrosão das armaduras.

O arquiteto e ex-diretor do museu, Júlio Neves, avançou para a troca do piso original escolhido por Lina Bo Bardi, a instalação de um segundo elevador e a construção de um terceiro subsolo.

Em suma, muitos arquitetos referem que as reparações causaram uma enorme descaracterização do projeto original de Lina Bo Bardi, mas no entanto, continua a ser um símbolo da avenida Paulista e dos paulistas, como mais um exemplo de construção de betão armado aparente.

2.3.2. Capela de *Notre-Dame du Haut* em Ronchamp

A capela de *Notre-Dame* foi construída com base no projeto do arquiteto franco-suíço *Le Corbusier* em 1954, em *Ronchamp*, na França. Esta capela é feita de betão armado aparente e a sua construção teve início em 1950 e conclusão em 1954. A capela de *Ronchamp*,

é um exemplo da arquitetura moderna (Steinhaus, 2010) e uma referência às construções de betão armado aparente, pela complexidade e cuidados na construção do edifício, para a obtenção do resultado final esperado.



Figura 13 – Capela de Ronchamp; <http://www.archdaily.com.br/>

O edifício é constituído por uma nave com dimensões de 13m x 25m que pode abrigar 200 pessoas. Inclui ainda três pequenas capelas, nitidamente isoladas da nave, que permitem a realização de tarefas simultâneas. É também perceptível uma torre semicilíndrica de 15 e de 22 metros, iluminada por três lados.



Figura 14 – Capela de Ronchamp; <http://www.archdaily.com.br/>

Este edifício é caracterizado por quatro muros que recebem as quatro fachadas e que representam os quatro pontos cardeais. O enorme teto de betão armado aparente proporciona a união entre os muros da capela e dá a impressão de se tratar de um navio (Palma, 2010).

Os muros côncavos e convexos, separados discretamente das três torres das capelas como representados na figura 14, são mais uma característica deste complexo projeto.

Em resumo, mais um exemplo de arquitetura moderna com recurso ao betão armado aparente e que foi alvo de processos de reabilitação cuidados, por se encontrar bastante degradado.

2.4. Cuidados gerais a ter no betão armado, desde o fabrico do betão à sua colocação e cura em obra.

O betão, como se sabe, é um material de fácil produção a partir de cimento, água e agregados. O surgimento e propagação dos seus defeitos, depende também de cuidados importantes a considerar e que a seguir se apresentam:

- Composição do betão: esta tem de atender a certos parâmetros com uma escolha criteriosa, em conformidade com classes de exposição ambiental. Parâmetros tais como o tipo de cimento, dosagem de cimento, razão água/cimento, teor de ar no betão fresco, classes de resistência e permeabilidade, são para ter em conta. A composição do betão deverá ser previamente estudada de modo a satisfazer as características que a sua utilização impõe, tendo em conta as condições particulares de fabrico, transporte, compactação e cura (Ferreira, 2000).
- Fabrico do betão: é uma fase fundamental na execução do betão armado. Referem-se alguns cuidados, nomeadamente com a manutenção dos seus componentes armazenados, com a adequação dos ligantes, assegurando que o betão fabricado corresponde aos requisitos pedidos. Uma das maiores causas de deterioração do betão é a carência de resistência, após o fabrico do mesmo. Através do emprego de cimentos de elevada resistência e de endurecimento rápido, resultou uma fabricação inadequada do betão para a sua função na estrutura, que indiretamente resultou na aproximação de armaduras e respetiva diminuição do recobrimento (Coutinho, 1998). Condições que são inadmissíveis presentemente, pois existem medidas e espessuras a serem seguidos regulamentarmente.

Mesmo que aquelas duas etapas se cumpram segundo as regras da boa execução, o transporte do betão é uma fase importante, por ser aquela que leva o betão fabricado até à obra, o que deve ser feito em excelentes condições, referidas de seguida.

- Transporte do betão: a segregação e perda de betão pelo caminho são inaceitáveis, assim como o seu transporte em dias de chuva; as superfícies que receberão o betão serão humedecidas antes de entrar em contacto com o mesmo; a caixa que leva o betão impedirá a aderência; o sistema de transporte tem de ser rápido o suficiente para se evitar o início de presa e a adição de água.

Entre o transporte e a colocação em obra do betão, tem-se em conta alguns cuidados relativos às cofragens e armaduras inseridas.

- Cofragens: ao nível do material em si, devem satisfazer requisitos que garantam a estanquidade, resistam a ações durante a construção e permitam a descofragem. Em termos de projeto têm de garantir a resistência, uma reduzida deformabilidade e necessitarão de ter em conta as ações atuantes na betonagem e na descofragem. Na sua montagem as cofragens têm de estar limpas antes da betonagem, sendo executadas conforme o projeto; os espaçadores a utilizar terão resistência e durabilidade adequadas às armaduras; o escoramento será executado de preferência com escoras tubulares ajustáveis.
- Armaduras: possuem cuidados especiais a ter em conta, para se evitar uma má betonagem e problemas de futuro. Para além de cumprirem com os requisitos estruturais do betão armado, têm de satisfazer cuidados de recobrimento e limpeza de armaduras; em conjunto haverá que evitar a corrosão das armaduras.

Os requisitos a cumprir são:

- Limpar as armaduras antes da betonagem, nomeadamente de ferrugem;
 - Aumentar o recobrimento e evitar agrupamentos de armaduras (Coutinho, 1998);
 - Utilizar betão com capilaridade suficientemente reduzida, para evitar a entrada e circulação de iões (Coutinho, 1998);
 - Respeitar o comprimento de amarração regulamentar;
 - Colocar as armaduras de forma a conseguirem suportar o impacto do betão e a sua vibração.
- Colocação em obra: tem grande influência no comportamento e no aspeto final da estrutura de betão, pois o facto de não se cumprir determinados passos, faz com que a compactação adequada não seja garantida. A colocação do betão em obra está diretamente relacionada com as interrupções de betonagem², previamente estudadas e

² Pontos frágeis de iniciação de deterioração

localizadas na preparação de obra, de modo a obter uma coerência entre juntas de trabalho e a sua estanquidade. As regras a serem cumpridas para se obter uma boa colocação em obra são:

- A colocação do betão tem de ser em camadas uniformes e não em montes ou camadas inclinadas;
- A espessura de uma camada terá de ser compatível com o método de vibração;
- A velocidade de colocação e de compactação tem de ser a mesma;
- A compactação de cada camada será executada antes da colocação da próxima camada, sendo a colocação efetuada quando a camada anterior ainda estiver plástica;
- A deslocação da cofragem e da armadura tem de ser evitada durante a colocação do betão;
- A colocação do betão é feita a baixa altura para se evitar a segregação;
- A colocação de betão a uma altura de queda superior a 1,5m será executada por uma manga ou por um tubo de queda;
- A movimentação do betão faz-se com uma pá ou com um ancinho;
- Em paredes coloca-se o betão por camadas de 500 mm (Betão Liz, 2013).

Depois dos cuidados referentes à colocação do betão em obra, regista-se a importância e influência que uma boa compactação do betão confere à durabilidade de uma estrutura de betão armado.

- Compactação do betão: as técnicas de compactação são um aspeto relevante nas propriedades de um betão, pois devem garantir uma adequada organização dos agregados entre si. A compactação pode ser manual, com vibrador, com agulha vibrante, com vibração da cofragem e também com mesas vibrantes, estas utilizadas na prefabricação.

Qualquer que seja a técnica adotada, para que se assegure uma estrutura bem compactada e protegida da corrosão das armaduras, há que ter em conta:

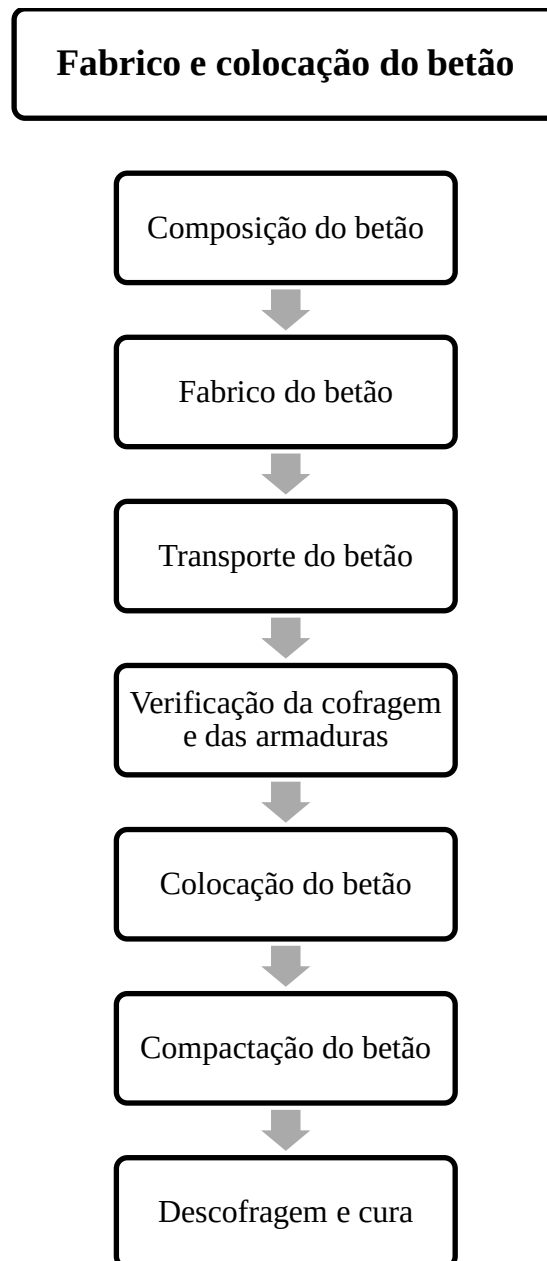
- A composição do betão ser a adequada;
- A frequência e duração da vibração deve ser devidamente estudada;
- A vibração deve ser homogénea, tanto no que se refere à vibração por agulha, como da vibração à cofragem;
- A vibração deve ser executada de modo a não afetar a armadura (Moreira, 1991).

A cura e a descofragem são as últimas etapas a ter em conta, no entanto, embora sejam as últimas, não podem ser menosprezadas pois há metodologias e regras a cumprir como se descreve de seguida.

- Cura do betão: o betão, para adquirir todas as características pretendidas, necessita de uma boa cura e esta é obtida por vários métodos, como manter a cofragem o maior tempo possível para que se impeça a secagem rápida do betão, cobrir as superfícies expostas com água, utilizar materiais que retardem a evaporação e utilizar membranas de cura que criam películas impermeáveis ao vapor de água.
- Descofragem: na construção tradicional rege-se por prazos mínimos de descofragem entre os 3 e os 28 dias de idade, conforme as peças e funções estruturais. Para se diminuir a aderência da peça de cofragem ao betão, costuma-se utilizar óleos descofrantes, que não sejam prejudiciais ao betão.

Pode-se afirmar que a descofragem e a cura se complementam na proteção do betão contra a desidratação, assegurando a resistência, a uniformidade da coloração, a impermeabilidade e ainda a resistência aos ataques químicos.

Todas estas etapas contribuem para um melhor desempenho, durabilidade e funcionalidade de uma estrutura de betão armado. A limpeza da superfície de betão após estas etapas também faz parte de um trabalho bem executado, tal como a proteção do betão descofrado até ao final da obra. A limpeza de caldas de cimento, de manchas de ferrugem, de óleo e de gorduras permitem evitar o aparecimento de crostas e manchas que contribuem para uma deterioração futura, para uma durabilidade mais limitada e para a perda da qualidade do aspeto.



Esquema 1 - Etapas na produção e colocação do betão

2.5. Durabilidade do betão armado

O betão armado caracteriza-se, durante a sua vida útil, por possuir capacidade de resistir aos processos de deterioração devido aos agentes agressivos, mantendo a sua forma, qualidade, desempenho e estabilidade inicialmente exigidas e estudadas.

Há que adotar alguns cuidados e critérios específicos relativos à sua durabilidade, tendo sempre em conta a identificação dos fatores que contribuem para a sua degradação.

Para o betão armado desempenhar melhor as suas funções tem de se intervir em alguns fatores importantes, ao nível dos projetos de estrutura e de arquitetura e ao nível dos processos de execução de obra, das metodologias de fiscalização e da manutenção da obra. Para se alcançar o tempo de vida útil para que foi projetada uma estrutura, os requisitos a ter em conta vão desde a sua conceção estrutural e da seleção dos materiais aos pormenores construtivos, ao controlo da qualidade e às disposições particulares (NP EN 1992-1-1, 2010).

Em relação à fase de execução de obra, quando cometidos pequenos erros, aparecem pontos de deterioração prematuros devido à utilização de componentes inadequados, fraca qualidade de mão-de-obra, cura insuficiente e recobrimento insuficiente, sendo este último o erro que mais influencia a durabilidade de uma estrutura; o bom estado do recobrimento deriva de dois fatores:

- Compactação que garanta uma camada uniforme e resistente;
- Tipo e duração da cura que limite ou evite a fendilhação.

Para além dos problemas da prática construtiva, outro fator que influencia a durabilidade do betão armado, quando exposto à água, é a maior ou menor facilidade com que se deixa atravessar por ela. Essa facilidade de atravessamento é função da sua compacidade e capilaridade, expressos pelo coeficiente de permeabilidade (Coutinho, 1998 (I e II)). Este problema está associado aos agentes agressivos provenientes da atmosfera, tais como:

- Poluição da atmosfera e sua ação química;
- Sujidades atmosféricas como o pó;
- Águas da chuva;
- Sedimentos provenientes da lavagem de edificações vizinhos.

Uma das medidas a adotar para contrariar a ação das águas da chuva, é a de, nas superfícies verticais, se adotarem descontinuidades como juntas ou goteiras, que encaminham as águas e preservam o resto da superfície. Também se pode evitar a penetração da sujidade e a absorção de água, controlando a compacidade, a capilaridade e a permeabilidade do betão, o que exige a adoção de todos os cuidados ao nível da cofragem e da minimização da formação de fissuras, como sejam a realização de uma boa cura, a compactação e a relação A/C, já referidas.

Em conclusão, todos estes cuidados referentes às práticas construtivas podem ser minimamente controlados, com uma mão-de-obra qualificada e profissional, que prolongará a durabilidade de uma estrutura. Já os fatores climáticos são aliados da degradação de uma

estrutura e variam largamente com o tipo de clima, a localização geográfica e a estação do ano.

Problemas como a carbonatação do betão resultam quase sempre de uma ação conjunta interna e externa, fortemente condicionada pelas propriedades químicas do betão (fator interno) e a forma como este está sujeito às intempéries (fator externo).

3. Causas e manifestações dos defeitos principais que se repetem no betão armado

3.1. Introdução

Neste capítulo apresentam-se as causas e os sintomas visíveis dos defeitos que originam a deterioração no betão armado; os métodos de reparação são referidos no capítulo 4. Distinguem-se as causas que afetam o betão das causas que afetam as armaduras, realçando as eletroquímicas, nomeadamente a carbonatação.

➤ Causas dos defeitos que afetam o betão:

- Causas de origem humana:

Relacionadas com o projeto, a especificação, a supervisão, a execução e com os produtos inadequados:

- Projeto estrutural incoerente;
- Composição do betão inadequada e amassadura e compactação insuficientes;
- Recobrimento insuficiente;
- Deficiente impermeabilização da superfície do betão;
- Contaminação por agregados de má qualidade;
- Cura inadequada.

- Causas de origem física:

- Gelo-degelo;
- Retração do betão;
- Ações térmicas;
- Erosão;
- Cristalização de sais à superfície do betão;
- Utilização/desgaste;
- Ação do fogo.

- Causas de origem química:
 - Reações álcalis-agregado;
 - Agentes agressivos;
 - Ações de origem biológica.
 - Causas de origem mecânica:
 - Impacto de corpos exteriores;
 - Sobrecargas excessivas;
 - Assentamentos de fundações ou de apoios;
 - Explosões;
 - Vibrações.
- Causas dos defeitos que afetam as armaduras:
- Causas de origem eletroquímica:
 - Carbonatação do betão: fatores que propiciam a sua origem e desenvolvimento são a dosagem e tipo de cimento, a razão A/C, a compactação e a cura do betão, a ação da chuva e a humidade;
 - Correntes parasitas;
 - Contaminantes corrosivos:
 - Cloretos presentes;
 - Cloretos provenientes do exterior.

3.2. Causas de origem humana

As causas de origem humana estão presentes no decorrer do ciclo de vida de uma estrutura, desde a fase de projeto às de construção, utilização e manutenção.

Os fatores mais comuns que se traduzem em falhas na fase de projeto de uma estrutura, podendo originar sérios problemas patológicos são diversos tais como:

- Avaliação defeituosa das cargas atuantes e modelação desajustada no dimensionamento da estrutura;
- Elementos de projeto inadequados;
- Falta da compatibilização entre projetos de estruturas e de especialidades;

- Insuficientes disposições quanto a exigências ambientais;
- Especificações inadequadas de materiais;
- Pormenorização insuficiente, errada e impraticável;
- Erros de dimensionamento;
- Falta de normalização das representações apresentadas.

Outro fator a ter em conta na fase de projeto é o cumprimento de um bom recobrimento, que depende essencialmente da espessura e da qualidade do betão, pré-definidos em função do tipo de elemento estrutural, compatível com a referida exposição ambiental.

Na fase de construção da estrutura de betão armado, as falhas humanas também surgem em situações de fiscalização deficiente, de pouco acompanhamento no terreno por parte do diretor de obra e de falta de mão-de-obra especializada, como se pode perceber no quadro 1.

Falhas humanas durante a construção	- Erros de betonagem	- Transporte do betão - Colocação do betão - Juntas de betonagem - Compactação do betão - Cura do betão
	- Escoramento desajustado	-----
	- Deficiência das armaduras	- Má interpretação dos projetos - Insuficiência de armaduras - Mau posicionamento das armaduras - Recobrimento insuficiente - Deficiência nas ancoragens - Deficiência nas emendas - Má utilização de anticorrosivos
	- Utilização incorreta dos materiais	- Valor da resistência inferior ao especificado - Aterro com solos de características diferentes - Utilização de agregados reativos - Utilização inadequada de adições - Dosagem inadequada de cimento
	- Ausência de controlo da qualidade	-----

Quadro 1 -Falhas humanas na construção (Souza & Ripper, 1998)

A fase de exploração também pode afetar a estrutura em causa quando esta é incorretamente utilizada, com cargas e esforços superiores aos adotados no projeto.

Todos os cuidados que se possam ter durante o início de vida de uma estrutura, como a composição, colocação e cura do betão, podem não ser suficientes se não se proceder a uma manutenção regular da estrutura de betão armado.

Os sintomas previstos neste tipo de causa são menos perceptíveis, mas no entanto alguns desses sintomas são:

- Fissuração de pouca profundidade e pontual, devida a retrações provenientes de curas incorretas e à escolha errada da classe de exposição, que levam à propagação de defeitos como a corrosão induzida por carbonatação.

Em suma, as causas de origem humana podem iniciar o desenvolvimento de patologias que as causas químicas e eletroquímicas só por si já propiciavam e que, com esta acumulação, se torna mais fácil.

3.3. Causas de origem física

3.3.1. Ciclos de gelo-degelo

O gelo-degelo é uma das causas físicas de deterioração de uma superfície de betão armado, devido à ação do gelo estar fortemente relacionada com o processo de alteração da água do interior do betão, do estado líquido para o estado sólido.

Apesar de não ser um problema muito comum em Portugal, há que ter em conta que as zonas que atinjam temperaturas abaixo dos 0°C em betões saturados, correm o risco de sofrer deteriorações, devido à possibilidade de a água que se encontra nos poros congelar e expandir. Ao dar-se o descongelamento, os poros ficam abertos e recetivos à nova entrada de água, dando início a ciclos consecutivos de congelação e descongelação.

Os sintomas previstos, facilmente detetados a nível visual, vão revelar fendilhação, delaminação e destacamento do betão e, em alguns casos, a sua decomposição integral.

A utilização de carotes extraídas do betão afetado por este fenómeno ajuda a detetar uma fendilhação interna, paralela à superfície associada à expansão dos poros, muito característica da deterioração por ciclos de gelo-degelo (Saraiva, 2007).



Figura 15 – Fendilhação devida a ciclos gelo-degelo; www.ehow.com.br

3.3.2. Retração do betão

A retração do betão é a redução de volume pela perda de humidade do betão, seja no estado fresco ou no estado endurecido e pode-se classificar em quatro tipos de retração: autogénea, plástica, térmica e a retração por secagem.

A retração química está associada à perda de água nos poros capilares.

A retração plástica resulta da evaporação de água à superfície em contacto com o meio ambiente, resultando em deformações produzidas no betão fresco. O excesso de água na mistura faz com que os agregados fiquem no interior do betão e a água à superfície.

A retração térmica é consequência da reação de hidratação do betão, pois este atinge temperaturas significativas.

A retração por secagem resulta da perda de água do betão endurecido, quando está exposto ao ar. O betão vai diminuindo de volume pela perda de água ao longo dos seus primeiros 4 a 5 anos de vida.

Os sintomas visíveis são a fendilhação do betão a qual pode surgir a poucas horas após a betonagem. Qualquer das retrações provoca a formação de fendas no betão, as quais podem mesmo atravessar o elemento por completo.



Figura 16 – Fendilhação devida à retração do betão; <http://www.engenhariacivil.com>

3.3.3. Ações térmicas

Este fenómeno dá-se quando existem variações de temperatura aliadas a restrições de movimento do betão armado e podem ser ações térmicas pontuais, diárias ou anuais.

Em resumo, a temperatura da superfície de uma estrutura ajusta-se rapidamente, ao contrário do interior, que se ajusta lentamente. Desta diferença resultam gradientes de temperatura que podem provocar danos nas estruturas.

Os sintomas visíveis são a fendilhação regular, com maior ocorrência nas zonas de restrição de movimentos. Também se pode identificar destacamento do betão devido aos choques térmicos.



Figura 17 – Fendilhação devida à ação térmica; emconstrucao10.blogspot.com

3.3.4. Erosão

Este fenómeno pode-se dividir em dois tipos de erosão: a abrasão e a cavitação, que levam à degradação da superfície de betão.

A abrasão caracteriza-se pelo desgaste de uma superfície devido aos repetidos movimentos de impacto, fricção de elementos, enrolamento e esfregamento por diversos agentes, sendo os mais comuns o ar e a água, que carregam partículas que provocam a abrasão, como os veículos em pavimentos industriais e o impacto das ondas.

A cavitação está relacionada essencialmente com o contacto da água com as superfícies que estão expostas a águas turbulentas em túneis ou barragens, obras em ambientes específicos, não visados neste trabalho.

Os sintomas visíveis no caso da abrasão são zonas de sulcos e agregados soltos devido aos impactos, mantendo uma superfície suave. Na figura 14 identificam-se vários tipos de desgastes, através dos resultados do teste de resistência à abrasão, que apresentam desgastes na ordem de 8,6 mm na zona denominada ‘CR’; cerca de 8,3 mm na zona ‘CAB5’; cerca de 6,2 mm na zona ‘CAB10’ e 3,7 mm na zona ‘CAB15’.

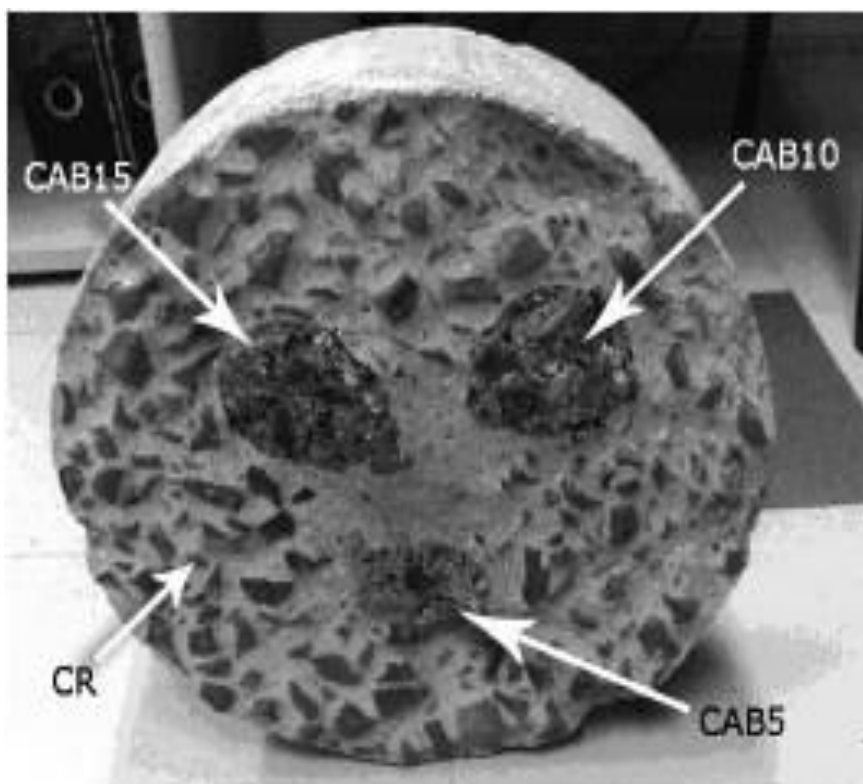


Figura 18 – Desgaste provocado pela abrasão; http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422009000400016&script=sci_arttext

3.3.5. Cristalização de sais

Este fenómeno assemelha-se ao do ciclo gelo-degelo, pois dá-se quando uma superfície está em contacto com uma solução aquosa de sais e ocorre a evaporação de água. Essas superfícies aliadas à permeabilidade do betão permitem que a exposição ao ar atmosférico, geadas e sais se exprima numa deterioração.

Pode-se dizer que este tipo de deterioração pertence a uma causa física, mas também a uma causa química, devido às reações e sintomas visíveis como as eflorescências, corrosão das armaduras e respetiva fendilhação do betão.

3.3.6. Utilização/Desgaste

Um fenómeno relevante, pois a utilização das estruturas de betão durante o seu ciclo de vida, causa o seu natural desgaste. O impacto é presumível e a fricção que ocorre nas estruturas de betão, são algumas das principais causas de degradação.

O sintoma mais visível é o destacamento do betão; o conhecimento sobre a utilização e idade do edificado ajudam a um melhor diagnóstico.

3.3.7. Fogo

A deterioração do betão pela ação do fogo está diretamente relacionada, com a desidratação dos constituintes da pasta de cimento. No entanto, o efeito do calor intenso está também relacionado com as temperaturas atingidas e o tempo que demora esse contato com a superfície de betão.

Apesar de o betão ser um material incombustível que não sustenta a propagação do fogo, perde gradualmente as suas propriedades e características à medida que a temperatura aumenta.

Os sintomas visíveis são a degradação do betão por fendilhação, destacamento e desintegração superficial do betão, mudança de cor e a perda de resistência inevitável.



Figura 19 – Deterioração pela ação do fogo; noticias.uol.com.br

3.4. Causas de origem química

As causas que a seguir se desenvolvem devem-se sobretudo à composição do cimento escolhido para o fabrico, à elevada concentração de hidróxido de cálcio que o betão contém, à porosidade do betão e às condições sob o qual este começa a endurecer.

O betão é um material bastante alcalino (com pH entre 12,5 e 13,5) e passível de sofrer ataques químicos, principalmente de ácidos minerais, ácidos orgânicos, açúcares, cloretos, compostos amoniacais, fenóis, nitratos, e soluções de sulfatos. Todas estas soluções, quando vertidas a quente sobre a superfície de betão e absorvidas, criam um depósito químico no interior do betão, que diminui o pH no seu interior (Ferreira, 2000).

A reação mais perigosa é por sulfatos, que provêm do contacto da estrutura de betão armado com águas que contêm resíduos industriais, águas subterrâneas em geral e água do mar. Os sulfatos mais perigosos para o betão são o de amónio $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$, o de cálcio (CaSO_4) , o de magnésio (MgSO_4) e o de sódio (Na_2SO_4) (Souza & Ripper, 1998).

3.4.1. Reações álcalis - agregado

Esta ocorrência baseia-se na reação entre os álcalis do cimento hidratado e os agregados reativos, que geralmente resultam em duas reações:

- Álcali-carbonatos (agregados calcários);
- Álcali-sílica (agregados como quartzo).

As reações mais prejudiciais são as relacionadas com a sílica e quando esta entra em contacto com hidróxido de cálcio, de potássio ou de sódio, pois forma um gel que expande quando em contacto com a humidade e que gera grandes tensões no interior do betão, fissurando-o com o aspeto de um mosaico.

Por outras palavras, a reação álcalis-sílica ocorre se forem usados agregados inadequados, no fabrico de betão. Alguns minerais siliciosos, entre os quais o quartzo, reagem com a água em ambiente alcalino, para formarem o gel de sílica, um material que expande quando absorve humidade e que causa a desagregação do betão (Broomfield, 2003).

Os sintomas visíveis revelam fendilhação irregular tipo teia de aranha, com o aparecimento de gel à superfície com a aparência de escorrimentos e, em certos casos, o aumento de volume do betão, como apresentado na fotografia 16.



Figura 20 – Fendilhação tipo teia de aranha; pt.dreamstime.com

3.4.2. Agentes agressivos

Os agentes químicos agressivos incluem águas da chuva, águas puras, ácidos e sulfatos.

O ataque por águas da chuva é um ataque geralmente muito lento, no qual o contato da superfície de betão com as águas da chuva ou águas descarbonantes origina a

decomposição do betão. Quando em contacto com o cimento Portland, aquelas águas, devida às suas características, tendem a dissolver produtos contendo cálcio. O hidróxido de cálcio é um composto muito reativo que, em contacto com o dióxido de carbono CO_2 , altera a pasta de cimento, com diminuição do pH do betão, o que propicia a corrosão das armaduras.

O ataque de ácidos pode ser o mais agressivo, pois afeta seriamente a resistência do betão. As reações de substâncias agressivas como os ácidos sulfúrico, carbónico ou nítrico, com os compostos de cálcio do betão, formam compostos secundários que permanecem de forma não aderente ao betão e que resultam na sua consequente degradação e perda de resistência (Sousa, 2008).

Por último, o ataque por sulfatos que, numa forma resumida, são sais que originam uma substância chamada etringite, resultado da combinação entre os iões de sulfato e os aluminatos do betão. A etringite dá-se durante a presa do betão e é constituída por cristais que se formam e ocupam os poros do betão, o que reduz a sua rigidez e a sua resistência (Ferreira, 2000). O resultado esperado destas combinações é a da expansão e fendilhação do betão.

Os sintomas visíveis são um pouco diferentes em cada um dos casos. No caso das águas da chuva encontra-se uma superfície de betão rugosa com cavidades, ao contrário do contacto com ácidos, que origina manchas de ferrugem, desintegração, fendilhação e delaminação do betão. Por fim, o ataque por sulfatos irá originar uma fendilhação mapeada, desintegração do betão e corrosão das armaduras.



Figura 21 – Corrosão por ataque de sulfatos; www.arqhys.com

3.4.3. Ações de origem biológica

Este tipo de ataque inclui a ação biológica direta e indireta.

A ação biológica direta traduz-se por um ataque mais rápido e incisivo que o da ação indireta pois, após os ensaios de identificação de bactérias que libertam os agentes agressivos como é o caso dos ácidos, nota-se que os mesmos provocam reações químicas que conduzem à deterioração imediata do betão, ao contrário do ataque indireto, que envolve o desenvolvimento de musgos, líquenes³ e raízes de plantas no exterior da superfície de betão, o qual pode provocar a sua deterioração (Sousa, 2008).

Por outras palavras, a ação biológica direta surge de micro-organismos que provocam um ataque quimicamente agressivo através da libertação de ácido sulfúrico e o ataque indireto baseia-se no desenvolvimento de organismos exteriores, que penetram nas fendas da estrutura e se desenvolvem no interior do betão (Souza & Ripper, 1998).

Os sintomas visíveis são os que caracterizam um ataque químico, como uma superfície manchada, com alteração da cor e desagregação do betão, pela penetração de fungos nas zonas mais frágeis e fendilhadas.



Figura 22 – Ataque biológico; www.electramag.com.br

³ Musgos e líquenes também podem conduzir à ação de ácidos.

3.5. Causas de origem mecânica

As causas seguintes agem de forma extrínseca ao betão armado, introduzindo-lhe um estado de tensão que atua de forma prolongada e/ou repetitiva, não compatível com a sua resistência, o que origina deformações e fissurações que podem conduzir à perda de funcionalidade da estrutura.

➤ Impacto de corpos exteriores:

O impacto de corpos exteriores à estrutura de betão, por exemplo de veículos, de pedras ou de máquinas, como é o caso das gruas, que podem causar tensões elevadas na estrutura de betão armado e esforços superiores aos admissíveis.

Os sintomas visíveis são perceptíveis na zona do impacto, onde se podem observar fenómenos como fendilhação, deformação, destacamento, descasque e esmagamento do betão.

➤ Sobrecargas excessivas:

Este fenómeno é facilmente explicável pela introdução de esforços superiores aos adotados no dimensionamento, como seja a utilização de um edifício dimensionado para habitação servir para uma biblioteca, onde o peso dos livros e arquivos podem significar um carregamento extra, originando uma eventual deformação.

Os sintomas visíveis irão revelar fendas de flexão, esmagamento do betão e deformações nas zonas de maior carga.

➤ Assentamentos de fundações ou apoios:

Trata-se de um fenómeno de que podem resultar esforços elevados e que é devido a assentamentos diferenciais das fundações ou à existência pontual de apoios de elevada rigidez.

Os sintomas são de difícil visualização e só com a ajuda de um levantamento topográfico se detetará desalinhamento e movimentação da estrutura.

➤ Explosões:

A explosão é uma ação que, devido às suas altas temperaturas instantâneas, ao impacto, pressões e ondas de choque, provocam danos e têm o efeito de cargas excessivas.

Nos sintomas visíveis, realça-se fendilhação, destacamento, deformação, alteração de cor, zonas crestadas e estilhaços cravados.

➤ Vibrações:

A última causa mecânica que aqui se refere é a vibração, geralmente caracterizada por ações de curta duração e com ciclos repetidos que resultam numa perda de resistência do elemento de betão armado, pela ação da fadiga. Esta causa pode ser provinda de sismos, equipamentos mecânicos e máquinas industriais.

Os sintomas visíveis são na zona mais afetada pela repetição das vibrações e pode-se observar a fendilhação e o destacamento do betão.

3.6. Causas eletroquímicas

Este mecanismo de degradação cujo sintoma é a corrosão das armaduras, envolve três fenómenos que são apresentados nos próximos pontos.

Tanto a carbonatação do betão como a ação dos cloretos presentes e ainda as correntes parasitas nas armaduras, originam a corrosão das armaduras, fenómeno a seguir descrito com o processo eletrolítico desenvolvido no ambiente envolvente.

A carbonatação do betão é uma das causas eletroquímicas de corrosão das armaduras, que resulta da difusão do dióxido de carbono atmosférico CO_2 , na presença de água, com os componentes do betão, como o hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de potássio (KOH) e hidróxido de cálcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$. Este está presente em maior quantidade no betão e a sua reação com o CO_2 , origina o carbonato de cálcio (CaCO_3).

O valor do pH no interior do betão para o meio se manter suficientemente alcalino situa-se entre os 12,5 e os 13,5 e varia com a concentração de $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, ou seja, quando o valor de $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ começa a baixar, a carbonatação aumenta, propagando-se da superfície do betão para o interior do mesmo, originando uma redução do valor de pH que tende para valores inferiores a 9,0, o que faz com que a película passiva diminua e deixe o aço vulnerável à sua corrosão.

Pode-se afirmar que a alcalinidade do betão é uma das principais razões químicas porque este é considerado um material de construção durável (Broomfield, 2003). O autor concorda com esta afirmação, mas realça que existem outras razões que contribuem para esse facto, como o de o betão proteger o aço das ações químicas e de os coeficientes de dilatação térmica do aço e do betão serem idênticos às temperaturas normais.

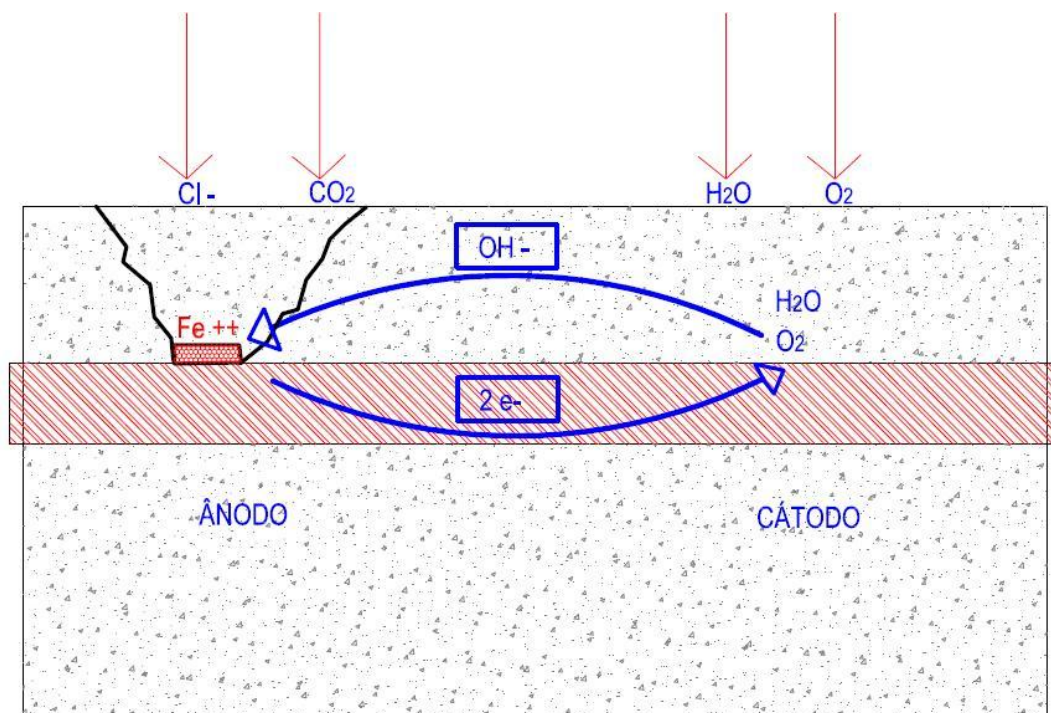
A despassivação das armaduras é o ponto fraco que dá início à corrosão das armaduras e começa quando o processo de carbonatação contribui para a diminuição do valor do pH e este fica inferior a 9, ou quando o teor de cloretos ultrapassa o seu valor crítico aceitável⁴. Nestas condições, está criado o ambiente propício para o início do mecanismo da corrosão (Costa, 2011).

Importa referir que, em qualquer situação, o mecanismo da corrosão é um processo eletroquímico que envolve reações químicas e correntes elétricas para que ocorra ânodo e cátodo.

O ânodo dá-se numa zona de armadura despassivada e explica-se pela libertação de eletrões e formação de iões (Fe^{2+}). O processo catódico dá-se numa zona de armadura com acesso a água e oxigénio, formando os iões hidroxilo (OH^-). A combinação dos iões hidroxilo com o ferro da liga do aço, origina a ferrugem (óxido de ferro), produto que resulta da corrosão. A velocidade com que este fenómeno se propaga, está relacionada com a passagem da humidade e do oxigénio do ar na zona catódica, como se pode ver no esquema 2.

Outra maneira de explicar este fenómeno é através do mecanismo da pilha, pois gera-se uma corrente elétrica que se dirige do ânodo onde ocorre a oxidação, para o cátodo onde ocorre a redução, e vice-versa, através da eletrólise produzida pela diferença de potencial, formando um ciclo deteriorante (Souza & Ripper, 1998).

⁴ O seu valor crítico encontra-se em 0,4% do peso do cimento.



Esquema 2 – Esquema demonstrativo da corrosão

As consequências deste processo fazem-se sentir no aço, no betão e na aderência entre estes dois materiais. O aço começa a perder a sua secção, o betão fissa e delamina devido à expansão volumétrica do óxido de ferro, e a aderência entre estes dois materiais desaparece, reduzindo a capacidade de resistência que juntos conferem ao betão.



Figura 23 – Corrosão das armaduras; <http://amigonerd.net>



Figura 24 – Delaminação do betão por corrosão das armaduras

Todo este processo é fundamentado em fenómenos que acontecem ao mesmo tempo, caso contrário, o processo da corrosão não é desenvolvido.

Para não se desenvolver o processo da corrosão, a película passiva das armaduras não pode estar destruída; a superfície da armadura não pode sofrer diferenças de potencial nem estar em contato com o oxigénio; as zonas catódicas não podem estar ligadas eletricamente. Para isto, a alcalinidade do betão não baixou, ou o elemento está submerso em água, ou simplesmente não existiu humidade suficiente no betão. Logo resulta a inexistência do ânodo, cátodo ou eletrólito e não haverá corrosão significativa (Costa, 2011).

Por fim, referem-se outros tipos de mecanismos de corrosão menos divulgados, como a corrosão galvânica que ocorre quando existem diferentes tipos de metais no meio eletrolítico, entenda-se, a introdução de outros metais em situações de reparações; ou a corrosão em espaços apertados, quando se aplicam resinas epóxi que evitam o acesso contínuo ao oxigénio e aceleram a corrosão em zonas vizinhas (Ferreira, 2000).

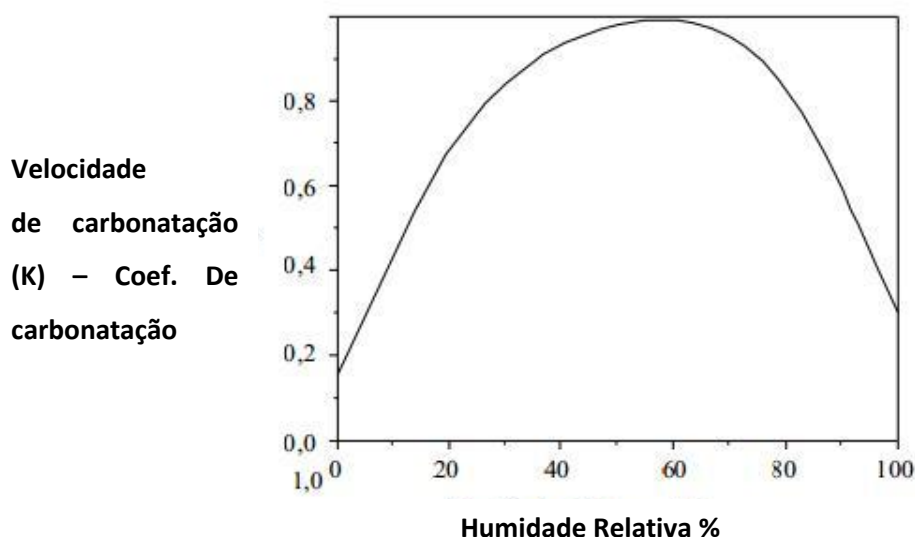
3.6.1. Carbonatação do betão

Devido à propagação da carbonatação se realizar da superfície exterior do betão para o interior do mesmo, uma das principais barreiras a este fenómeno de deterioração e que pode caracterizar a resistência de uma superfície de betão à difusão de CO_2 e respetiva carbonatação, é uma boa camada de recobrimento da armadura sem fissuração e aliada a uma boa compactação e cura do betão.

As condições de cura influenciam a propagação da carbonatação, pois estão diretamente relacionadas com o grau de hidratação do cimento e a sua porosidade. Uma cura rápida provoca o aumento da porosidade, do que resulta uma maior capacidade de difusão do CO_2 e o desenvolvimento da carbonatação. A existência de fissuras numa superfície, mesmo com uma boa camada de recobrimento, boa compactação e cura do betão, é um ponto fraco pois permite a penetração mais rápida e a uma maior profundidade de CO_2 , deixando uma área de desproteção ideal para a carbonatação (Simas, 2007).

Em geral, em betões C20/25 observa-se que a velocidade de carbonatação varia entre 1 a 3 mm por $\sqrt{\text{ano}}$; a velocidade de carbonatação depende de fatores extrínsecos e intrínsecos ao betão. A nível de fatores intrínsecos, depende respetivamente da humidade relativa existente, da quantidade de CO_2 presente, do tipo e quantidade de cimento usado, da relação A/C e dos tipos de adições que se fazem ao betão.

Os fatores extrínsecos dependem do ambiente a que a superfície de betão armado está sujeita, pois a localização influencia a humidade relativa e teor de CO_2 , que por sua vez influenciam a velocidade de propagação da carbonatação. Em valores com a humidade relativa entre os 50 e os 70% e uma quantidade significativa de CO_2 , pode-se atingir o valor máximo do grau de carbonatação, tal como se demonstra o esquema 3.



Esquema 3 – Valores da carbonatação em função da HR do ambiente (Simas, 2007)

Há que ter em conta que a concentração de CO_2 depende do meio a que a estrutura de betão armado está submetida: valores como 0,03% em volume de concentração de CO_2 nos ambientes rurais; 0,1% em volume de concentração de CO_2 nos meios urbanos mediantemente

povoados e 0,3% em volume de concentração de CO_2 nas zonas altamente povoadas (Simas, 2007). Uma grande concentração de CO_2 também pode estar presente em zonas fechadas como túneis ou garagens de veículos pesados.

Ao nível da composição do betão realçam-se os aspetos mais importantes, como a importância da razão A/C, da quantidade e tipo de cimento, das adições que se fazem aos betões e HR do betão:

- A razão A/C condiciona a profundidade de carbonatação através da estrutura porosa do betão, pois quanto maior a razão A/C, maior a porosidade do betão e melhor a penetração de CO_2 , que desenvolve a carbonatação => aumento do coeficiente de difusão de CO_2 no betão;
- As adições que se costumam introduzir no betão podem resultar em pontos negativos ou positivos. Se reduzirem a porosidade do betão, ajudam ao combate à carbonatação, mas se forem utilizados como um substituto de cimento, fazem com que a velocidade de carbonatação aumente pois haverá diminuição do teor de $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ (Costa, 2012b);
- A quantidade e tipo de cimento presente no betão influencia diretamente a velocidade da carbonatação, pois quanto mais cimento houver, mais $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ estará presente para combater a difusão de CO_2 e a velocidade de carbonatação será menor;
- Humidade relativa do betão.

Visto que o CO_2 se difunde muito mais rapidamente no ar do que na água, conclui-se que a carbonatação se propaga mais em ambientes húmidos protegidos, do que em zonas desprotegidas em constante contato com a água. A difusão de CO_2 em betões saturados (HR=100%) é muito lenta e o meio mais favorável à propagação da carbonatação envolve o mínimo contato com a água da chuva, em ambientes com HR média e em ambientes urbanos densamente povoados com tráfego intenso.

Atualmente tem-se em conta para edifícios correntes, inseridos em ambientes urbanos (NP EN 206-1, 2007):

➤ Sem risco de corrosão:

- Classe X0 - Ambiente muito seco – Betão no interior de edifícios com muito pouca humidade do ar.

➤ Corrosão induzida por carbonatação:

- Classe XC1 – Ambiente seco ou permanentemente húmido – Betão no interior de edifícios com baixa humidade do ar;

- Classe XC2 – Ambiente húmido, raramente seco – Superfícies de betão sujeitas a longos períodos de contacto com a água;
- Classe XC3 – Ambiente moderadamente húmido – Betão no interior de edifícios com moderada ou elevada humidade do ar, assim como betão no exterior protegido da chuva;
- Classe XC4 – Ambiente ciclicamente húmido e seco – Superfícies de betão sujeitas ao contato com a água, fora do âmbito da classe XC2.

Os sintomas visíveis serão manchas de ferrugem na superfície do betão, fendilhação alinhada com as armaduras e, em alguns casos de maior propagação, a delaminação do betão com exposição das armaduras.

Para maior estudo e confirmação da zona carbonatada, recorre-se a uma solução de fenolftaleína que passa de incolor para rosa quando se encontra na zona sã e permanece incolor quando presente na zona carbonatada, como se pode ver na imagem seguinte (Saraiva, 2007).



Figura 25 – Profundidade da carbonatação com recurso à fenolftaleína;

3.6.2. Contaminantes agressivos

A principal agressão proveniente de contaminantes agressivos, tem essencialmente a ver com a ação dos cloretos de origem interna ou externa.

Em geral a corrosão por ação dos cloretos é uma corrosão localizada, por picadas. Este tipo de corrosão provoca uma grande diminuição da secção das armaduras, chegando mesmo a desenvolver-se com uma velocidade dependente da existência de fissuras e da qualidade do betão.

De seguida descrevem-se mais pormenorizadamente cada uma das referidas agressões e os sintomas visíveis.

➤ Cloretos presentes no betão:

Os cloretos de origem interna são os cloretos presentes no betão através de água da amassadura contaminada, de agregados geralmente provenientes da praia e ainda através da utilização de adjuvantes que contenham cloreto de cálcio, destinadas a acelerar a presa do betão.

Todas estas condições fazem com que haja um aumento da quantidade de cloretos no betão e se inicie uma corrosão localizada das armaduras.

A presença de cloretos é inconveniente para o betão, pois quando satisfeitas outras condições, aceleram a corrosão eletrolítica das armaduras. Podem-se referir as condições mais importantes:

- Recobrimentos pouco espessos;
- Proximidade de correntes elétricas de alta tensão;
- Peças metálicas embutidas no betão como chumbadores;
- Junção de alumínio e aço no mesmo meio.

Por exemplo a retração do betão pode duplicar em relação ao betão sem presença de cloretos (Souza & Ripper, 1998).

Os sintomas mais visíveis (nestas situações pode ser útil a realização de uma análise química para conferir a quantidade de cloretos presentes) traduzem-se em manchas de ferrugem, fendilhação em linhas paralelas e alinhadas com a armadura e delaminação do betão.



Figura 26 – Manchas de ferrugem, fissuração alinhada com a armadura e delaminação do betão;
<http://amigonerd.net>

➤ Cloretos de origem externa:

Os cloretos de origem externa provêm da água do mar, do ambiente marítimo e de sais utilizados para provocar o degelo.

Estes cloretos penetram no betão, em função da sua porosidade e de grau de saturação. As grandes obras em ambientes marítimos exigem proteções e recobrimentos especiais, com o objetivo de se obter uma elevada durabilidade.

Mesmo assim, em zonas de rebentação marítima e com grandes ciclos de molhagem/secagem, a deterioração é quase impossível de travar. O fenómeno da corrosão por cloretos propaga-se pelo transporte em meio líquido de iões (Cl^-), por permeação, absorção e difusão, como demonstra a figura 23.

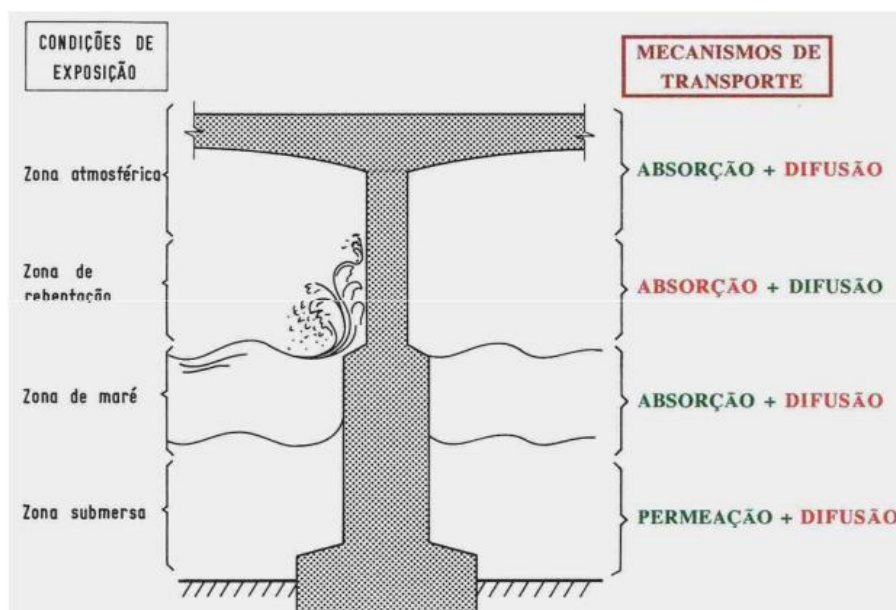


Figura 27 – Transporte de cloretos exteriores à estrutura de betão (Costa, 2011)

A imagem demonstra as diferentes fases de penetração dos cloretos, combinando um mecanismo de transporte rápido (cor verde) com um lento (cor vermelha). Do lado esquerdo identificam-se as diferentes exposições a que uma estrutura de betão armado está sujeita e do lado direito a combinação entre os diferentes mecanismos de transporte.

A deterioração e os sintomas são idênticos à situação dos cloretos presentes na amassadura, tais como fissuras horizontais, arestas que estalam e delaminação.

3.6.3. Correntes parasitas

A corrosão das armaduras por correntes parasitas processa-se quando uma fonte externa fornece uma diferença de potencial entre o ânodo e o cátodo, ou seja, ocorre uma troca de correntes elétricas entre as armaduras e o meio eletrolítico.

O fluxo de eletrões necessário para iniciar este tipo de corrosão é geralmente fornecido por elementos externos à estrutura, como será o caso de um gerador ou de linhas de alta tensão (Saraiva, 2007), mas também existem outros elementos externos como os sistemas de proteção catódica vizinhas, comboios elétricos em viadutos sem ligação terra e máquinas de soldar. Os sintomas visíveis são a fendilhação e a delaminação como na carbonatação.

A medição da intensidade de corrente nas estruturas é uma avaliação que ajuda na perceção deste fenómeno.

3.7. Resumo das causas e sintomas referidos

Em conclusão apresenta-se um quadro resumo, com os sintomas referidos pertencentes a cada causa:

CAUSAS		SINTOMAS
<u>Origem humana</u>	Deficiente drenagem; deficiente pormenorização da armadura	Fendilhação; Assentamento e segregação do betão; eflorescências e delaminação
<u>Origem física</u>	Gelo-degelo	Fendilhação; Delaminação e destacamento
	Retração do betão	Fendilhação
	Ações térmicas	Fendilhação e destacamento
	Erosão	Desintegração; desgaste e perda de pasta de cimento
	Cristalização de sais	Eflorescências; Fendilhação e delaminação
	Utilização/ Desgaste	Destacamento
	Ação do fogo	Fendilhação; Delaminação; Destacamento; Desintegração e perda de cor
<u>Origem química</u>	Reações álcalis-agregado	Fendilhação e destacamento por aumento do volume de betão
	Agentes agressivos	Fendilhação; Delaminação; Desintegração e destacamento por corrosão de armaduras
	Ações de origem biológica	Fendilhação; Desagregação; Manchas e alteração de cor
<u>Origem mecânica</u>	Impacto	Fendilhação; Destacamento; Esmagamento; Descasque e deformação
	Sobrecargas excessivas	Fendilhação; Esmagamento e deformação
	Assentamento de fundações	Fendilhação e deformação
	Explosões	Fendilhação; Destacamento; Deformação e alteração de cor
	Vibrações	Fendilhação e destacamento
<u>Origem eletroquímica</u>	Carbonatação do betão	Fendilhação; delaminação; manchas de ferrugem e corrosão
	Contaminantes agressivos como cloretos e correntes parasitas	Fendilhação; delaminação e corrosão

Quadro 2 – Quadro resumo das relações entre causas e sintomas

4. Patologias das estruturas de betão armado (segundo a NP EN 1504)

A identificação das patologias nas estruturas de betão armado é uma atividade inserida no âmbito da Engenharia Civil, que procura saber as causas, fenómenos e sintomas de deterioração, já referidos no capítulo 3. Perceber as deteriorações em causa e intervir bem leva à escolha da estratégia de atuação (princípio) e do método de reparação adequado e aos principais fatores a considerar nas superfícies de betão, antes da aplicação prática de cada método.

Para isso e para um melhor guia, adotam-se as diversas partes da Norma Portuguesa EN1504 publicada entre o ano 2005 e o ano 2009, espaço de tempo que deu origem às 10 partes desta norma. Esta define os produtos e sistemas para a proteção e reparação das estruturas de betão que tenham sofrido ou possam sofrer deteriorações.

Os pontos-chave do processo de reparação das estruturas são referidos na Parte 9 da norma e são (NP EN 1504-9, 2009):

- Condições estruturais do edificado,
- Origem das causas de deterioração,
- Decisão entre proteção e reparação,
- Escolha dos princípios e métodos a utilizar,
- Definição dos produtos e sistemas,
- Especificação para a manutenção após o método utilizado.

4.1. Perceção dos defeitos das estruturas no local e do seu estado de deterioração – inspeção da estrutura

É necessária uma ponderação das condições de deterioração de uma estrutura de betão armado, para se poder avaliar a estabilidade mecânica da mesma. Sendo considerada insegura, tem de se adotar um conjunto de regras que evitem riscos adicionais, aquando da realização do trabalho de reparação.

As bases para o processo de inspeção de uma estrutura são os seguintes (NP EN 1504-9, 2009):

- Defeitos visíveis na estrutura de betão, como fendilhação ou delaminação;

- Ensaaios que permitam avaliar a condição em que se encontra o betão e as armaduras;
- Projeto inicial e evolução da construção;
- Exposição a que a estrutura se encontra e ambiente envolvente;
- Cargas e ações para que a estrutura foi dimensionada;
- Condições a exigir para futuras utilizações.

De seguida desenvolve-se cada um dos pontos bases referidos:

- Defeitos visíveis na estrutura de betão:

Em relação ao estado visível da estrutura, há que verificar em que níveis se encontram as deteriorações e qual a tendência da sua evolução, pois, a partir de certa altura, o elemento tende a não satisfazer o propósito estrutural a que foi destinado.

No sentido de se avaliar a extensão que a deterioração atinge em termos de corrosão de armaduras, procede-se a uma identificação de anomalias visíveis e classifica-se de modo a filtrar os defeitos encontrados (LNEG, 2012):

- Fissuras derivadas da corrosão das armaduras;
- Perdas de betão devido à delaminação, por vezes com exposição das armaduras;
- Redução da secção das armaduras;
- Zonas de destacamento do recobrimento devido à corrosão das armaduras.

- Ensaaios adicionais de avaliação:

Após a avaliação do estado da estrutura e dos riscos iminentes, são realizados ensaios que introduzem alternativas e avaliações adicionais em relação aos resultados identificados visualmente, com base na experiência do técnico.

Estes ensaios são documentados e guardados, para no futuro se poder ter um historial da estrutura de fácil consulta. Os ensaios que podem ser executados para a melhor escolha de métodos de proteção contra a corrosão das armaduras, são (LNEC, 2000):

- Medição do recobrimento das armaduras com o pacómetro;



Figura 28 – Medição do recobrimento recorrendo ao pacómetro (LNEG, 2012)

- Medição da profundidade da carbonatação recorrendo à fenolftaleína;



Figura 29 – Frente de carbonatação recorrendo à fenolftaleína (LNEG, 2012)

- Amostragem de pó resultante de perfurações a diferentes profundidades e junto das armaduras para determinar o teor de cloretos no betão;
- Extração de carotes para determinação de resistência mecânica, observação macroscópica e petrográficas;

- Ensaio eletroquímico da armadura, recorrendo à medição do potencial do eléctrodo, para detetar a corrosão das armaduras ocultas;
- Medição da resistividade elétrica do betão, feita em conjunto com o ensaio eletroquímico, o qual permite saber o estado de corrosão das armaduras e a distinção de zonas passivas e ativas;
- Adoção da técnica de resistência de polarização que quantifica a taxa de corrosão das armaduras em betões muito carbonatados;
- Medição da intensidade de corrosão das armaduras.

➤ Projeto inicial e evolução do edificado:

Os documentos que fazem parte da história do edificado, assim como o seu projeto inicial, vão também influenciar a escolha do princípio e do método de reparação. Tem-se em conta se, após a reparação, a utilização que vai ser dada à estrutura se mantém, ou se a vida útil da mesma justificará tal intervenção.

Para além da vida útil do edificado, outros aspetos base a ter em conta relacionados com o passado da estrutura e o seu tipo de utilização, são (NP EN1504-9, 2009):

- Alterações ao uso da estrutura durante o decurso da sua vida útil;
- Resistência da estrutura ao fogo e sua estanquidade;
- Vida útil após trabalhos de reparação;
- Número de vezes que já se reparou a estrutura e custos dos trabalhos adicionais de proteção, reparação e acompanhamento;
- Estratégias alternativas, como inspeções e manutenções já executadas;
- Propriedades das superfícies existentes;
- Estética após a reparação da estrutura.

➤ Exposição e ambiente envolvente:

Outro dos pontos base para o processo de avaliação de uma estrutura é a questão ambiental. Embora esta questão não esteja muito valorizada na Norma, a consideração em relação ao ambiente que rodeia a estrutura a intervencionar, está a ser cada vez mais mencionada e referida. Em resumo:

- Proteção dos recursos naturais;
- Cumprimento das imposições ambientais quando da escolha do método;

- Previsão dos efeitos secundários na intervenção a realizar;
- Dados relativos aos recursos naturais antes da intervenção, para que após a conclusão se mantenham esses recursos;
- Método de intervenção, o qual pode ser mudado com a ajuda de especialistas ambientais;
- Medidas preventivas que minimizem alguns impactos negativos que possam surgir (Saraiva, 2007).

➤ Cargas e ações dimensionadas:

Um aspeto diferente de ordem técnica baseia-se nas condições estruturais do edificado, como as novas ações que vão ser aplicadas à estrutura e a forma como esta resistirá. As ações que se fazem sentir durante e logo após a metodologia aplicada, também têm de ser levadas em conta.

É fundamental escolher as reparações tendo em conta os fatores de segurança e saúde, pois para além da identificação da origem/causa do problema, tem de se saber se existe algum perigo ou possibilidade de rotura estrutural durante a intervenção e os efeitos que isso irá provocar nos ocupantes ou nos utilizadores da estrutura.

➤ Condições futuras:

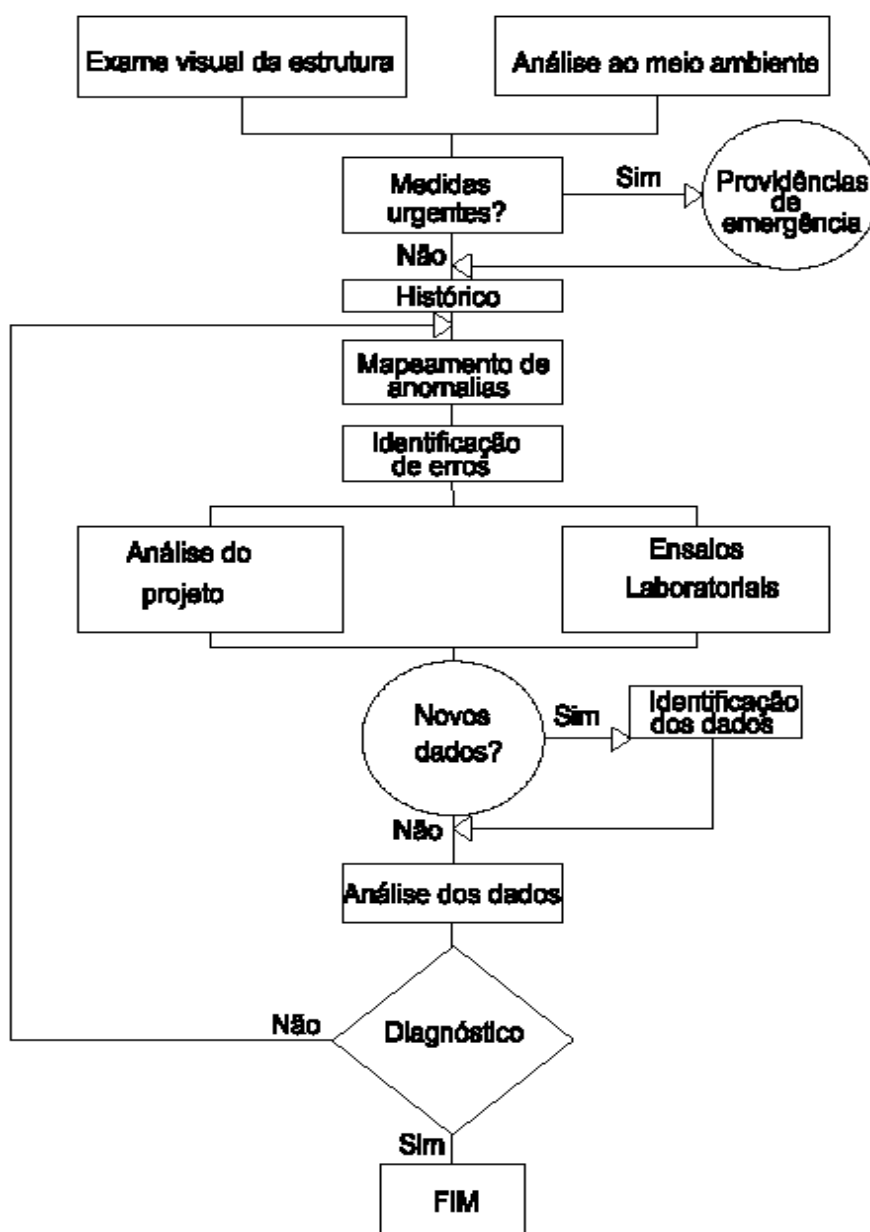
Por fim, o último ponto tem em conta as futuras intervenções, quando se põem em prática os métodos de reparação escolhidos e se executam de forma a deixar acessos para futuras reparações e renovações do sistema em causa. Mas, como até aqui, tem-se em consideração alguns pontos para atender quando se estiver na presença de intervenções futuras (NP EN1504-9, 2009):

- Acompanhar sem fazer nada;
- Recalcular a capacidade estrutural;
- Prevenir deteriorações de outra natureza;
- Reforçar, reparar e proteger a estrutura de betão;
- Reconstruir a estrutura de betão;
- Perante um risco de colapso da estrutura, demolir toda ou parte da estrutura de betão.

Todo este processo descrito é cíclico e pode ser interpretado de acordo com o esquema 4.

Em linhas gerais, tem de se observar bem a estrutura em causa, com registo de informação, organização de documentação, historial da estrutura a nível de manutenção e seu desempenho após as intervenções (Catarino, 2010).

A intervenção adotada tem de ser adequada à causa, para as condições a que está exposta, seguindo os princípios da norma (apresentados no capítulo seguinte), mas não pode ser escolhida só de acordo com os aspetos técnicos, pois os económicos, sociais e ambientais são muito importantes nesta linha de pensamento, o que ajuda imenso à organização da intervenção técnica.



Esquema 4 – Ciclo de regras a seguir antes da escolha do método (Souza & Ripper, 1998)

4.2. Escolha dos métodos de reparação e proteção de estruturas de betão armado

Os métodos de reparação desenvolvidos na Norma Portuguesa EN 1504 têm em conta, como referido no ponto anterior, vários aspetos como o tipo de utilização da estrutura, a história da estrutura, as manutenções efetuadas, a possibilidade de reparações futuras, as condições de acesso e os custos inerentes.

Para além das regras referidas, é conveniente que estes métodos estejam em conformidade com aquela norma ou com outras normas relevantes que não se apresentam neste trabalho. A EN 1504 define 43 métodos de reparação, agrupados em 11 princípios que possibilitam a prevenção das causas de deterioração físicas, químicas e eletroquímicas, que surgem no betão e nas armaduras.

Os princípios e métodos apresentados necessitam de um acompanhamento rigoroso que os ensaie e avalie, antes e após a sua aplicação. Estes métodos têm de se basear em princípios, cuja não satisfação poderá levar a consequências, na utilização de um método particular ou na combinação deles (NP EN 1504-9, 2009).

Os métodos seguidos pela norma abrangem as causas já conhecidas, como:

- Ações humanas - Princípios 1 a 6;
- Ações mecânicas - Princípios 1 a 6;
- Ações físicas - Princípios 1 a 6;
- Ações químicas - Princípios 1 a 6;
- Ações eletroquímicas - Princípios 7 a 11 ⁵.

Para além destas ações, os princípios consideram também a impermeabilização e o reforço estrutural, de forma a dar continuidade à vida útil da estrutura.

Outro método prático que será referido no capítulo 5 como a realcalinização é um processo eletroquímico utilizado, desde que haja documentação que comprove o seu êxito em aplicações anteriores.

De seguida são apresentados todos os princípios e métodos propostos pela NP EN 1504:

⁵ Quando ocorre corrosão da armadura, geralmente escolhe-se mais que um princípio para a corrigir.

- Princípio 1 – A proteção contra a penetração de agentes agressivos está relacionada com defeitos no betão e intervenções de proteção ou prevenção em relação a essa penetração e às reações álcalis-agregados que deterioram o elemento de betão. É um princípio extremamente importante para combater a fragilidade da camada superficial, incluindo medidas de redução da porosidade e permeabilidade da mesma (NP EN 1504-9, 2009):
 - MR1.1 – Impregnação hidrofóbica,
 - MR1.2 – Impregnação,
 - MR1.3 – Revestimento superficial,
 - MR1.4 – Fendas localmente tapadas,
 - MR1.5 – Enchimento de fendas,
 - MR1.6 – Transformação de fendas em juntas,
 - MR1.7 – Colocação de painéis externos,
 - MR1.8 – Aplicação de membranas.

- Princípio 2 – O controlo da humidade está relacionado com defeitos no betão e permite confinar alguns tipos de deterioração que se propagam com este tipo de ambiente, como a corrosão, a carbonatação e os ciclos gelo/degelo. Tem-se em atenção que os métodos a adotar para combater estas deteriorações, são permeáveis ao vapor de água permitindo a saída da humidade (NP EN 1504-9, 2009):
 - MR2.1 – Impregnação hidrofóbica,
 - MR2.2 – Revestimento superficial,
 - MR2.3 – Proteção física ou camada de recobrimento,
 - MR2.4 – Tratamento eletroquímico.

- Princípio 3 – A substituição de betão está relacionada com defeitos no betão, devido a ações mecânicas como impactos e vibrações, mas também por erosão ou delaminação por corrosão das armaduras. Pode-se aplicar argamassa à mão mas também se recorre à projeção de betão (NP EN 1504-9, 2009):
 - MR3.1 – Aplicação de argamassa à mão,
 - MR3.2 – Nova betonagem,
 - MR3.3 – Projeção de argamassa ou de betão,

- MR3.4 – Substituição de elementos.

- Princípio 4 – O reforço estrutural está relacionado com defeitos no betão e é maioritariamente utilizado em questões em que o betão se encontra extremamente deteriorado e se possa encontrar com a sua capacidade resistente limitada. Daí a utilização de métodos que reforcem a capacidade resistente da estrutura do betão armado (NP EN 1504-9, 2009):
 - MR4.1 – Adição ou substituição de armaduras externas ou internas,
 - MR4.2 – Colocação de armaduras em furos existentes ou a fazer,
 - MR4.3 – Colagem de chapas de reforço,
 - MR4.4 – Colocação de argamassa à mão,
 - MR4.5 – Injeção de fendas ou vazios,
 - MR4.6 – Enchimento de fendas ou vazios,
 - MR4.7 – Pré tensão ou pós tensão.

- Princípio 5 – A resistência física está também relacionada com defeitos à superfície do betão e aplica-se após se conhecer a origem do problema, pois pode-se estar a lidar com defeitos diversos como a erosão, os ataques biológicos e o desgaste da superfície. O aumento da resistência da estrutura ao nível superficial é o objetivo deste princípio (NP EN 1504-9, 2009):
 - MR5.1 – Camadas de recobrimento ou revestimento,
 - MR5.2 – Impregnação,
 - MR5.3 – Adição de argamassa ou betão.

- Princípio 6 – A resistência ao ataque químico está relacionada com defeitos no betão, que por vezes sofre ataques químicos. Após serem identificados os agentes químicos existentes, adequam-se os métodos e produtos (NP EN 1504-9, 2009):
 - MR6.1 – Camadas de recobrimento ou revestimento,
 - MR6.2 – Adição de argamassa ou betão.

- Princípio 7 – A preservação ou restituição da camada passiva das armaduras, está relacionada com defeitos na armadura, quando esta se encontra em despassivação e dispõe de cinco métodos diferentes para evitar ou limitar a corrosão das armaduras (NP EN 1504-9, 2009):
 - MR7.1 – Aumento do recobrimento com argamassa ou betão,
 - MR7.2 – Substituição de betão contaminado ou carbonatado,
 - MR7.3 – Realcalinização eletroquímica do betão carbonatado,
 - MR7.4 – Realcalinização do betão carbonatado por difusão,
 - MR7.5 – Extração eletroquímica dos cloretos do betão.

- Princípio 8 – O aumento da resistividade do betão está relacionado com defeitos na armadura, pois pretende-se evitar a corrosão das armaduras limitando as trocas entre ânodos e cátodos, por via de diminuição da humidade e consequente aumento da alcalinidade e resistividade do betão, através de tratamentos superficiais repelentes da água, impregnações preenchendo poros ou revestimentos superficiais tais como nos ‘princípios 1 e 2’ (NP EN 1504-9, 2009):
 - MR8.1 – Impregnação hidrofóbica,
 - MR8.2 – Revestimento superficial.

- Princípio 9 – O controlo catódico relacionado com defeitos na armadura baseia-se na impossibilidade de desenvolvimento de um processo eletroquímico, pela limitação do teor de oxigénio nas armaduras evitando a sua corrosão (NP EN 1504-9, 2009):
 - MR9.1 – Limitação do teor de oxigénio no cátodo por saturação do betão ou revestimentos superficiais.

- Princípio 10 – A proteção catódica é um princípio que está relacionado com defeitos na armadura, sendo utilizada em situações de corrosão das armaduras por carbonatação ou cloretos. Utiliza-se uma passagem de baixa corrente, exterior ao elemento de betão, o que origina um ânodo exterior que se vai sacrificar,

recebendo todos os iões que provocam a corrosão da armadura, de forma, a eliminar ou prevenir a deterioração da mesma (NP EN 1504-9, 2009):

- MR10.1 – Aplicação de potencial elétrico.

- Princípio 11 - Controlo das áreas anódicas é o último dos onze princípios e está também relacionado com defeitos na armadura. Através de revestimentos diretos na armadura ou de inibidores de corrosão no betão, pode-se prevenir a formação de zonas anódicas que provocam a deterioração do aço (NP EN 1504-9, 2009):
 - MR11.1 – Pintura das armaduras com tintas que contenham pigmentos ativos,
 - MR11.2 – Pintura das armaduras com tintas que funcionem como barreiras,
 - MR11.3 – Aplicação de inibidores de corrosão no betão.

Após a descrição de todos os princípios e enumeração dos métodos referentes à proteção ou reparação do betão contaminado conforme a causa originária da sua deterioração, está tudo encaminhado para a escolha do método e preparação da superfície do betão antes da sua aplicação. Para essa escolha, o autor apresenta o quadro 3 com a correspondência entre as causas apresentadas no capítulo 3 e os métodos atrás enumerados.

CAUSAS		SINTOMAS	Métodos mais apropriados a aplicar															
<u>Origem Humana</u>	IIIIII	Fendilhação	MR1.3	MR1.4	MR1.5	MR1.6	MR4.5	MR5.1	MR6.1									
<u>Origem Física</u>	Gelo-degelo	Fendilhação; Delaminação e destacamento	MR2.1	MR2.2	MR2.3	MR2.4	MR2.5											
	Retração do betão	Fendilhação	MR1.3	MR1.4	MR1.5	MR1.6	MR3.3	MR3.4	MR4.5	MR4.6	MR5.1							
	Ações térmicas	Fendilhação e destacamento	MR1.3	MR1.4	MR1.5	MR1.6	MR3.3	MR3.4	MR4.5	MR4.6	MR5.1							
	Erosão	Desintegração e desgaste	MR1.7	MR3.1	MR3.2	MR3.3	MR3.4	MR5.1	MR5.2	MR5.3								
	Cristalização de sais	Eflorescências; Fendilhação e delaminação	MR2.1	MR2.2	MR2.3	MR2.4	MR2.5											
	Utilização/ Desgaste	Destacamento	MR1.7	MR3.1	MR3.2	MR3.3	MR3.4	MR5.1	MR5.2	MR5.3								
<u>Origem Química</u>	Ação do fogo	Fendilhação; Delaminação; Destacamento; Desintegração e perda de cor	MR1.4	MR1.5	MR3.1	MR3.2	MR3.3	MR5.1										
	Reações álcalis-agregado	Fendilhação e destacamento por aumento do volume de betão	MR1.1	MR1.2	MR1.3	MR1.4	MR1.5	MR1.6	MR2.1	MR2.2	MR2.3	MR2.4	MR2.5	MR 3.1	MR 3.2	MR 3.3	MR 3.4	
	Agentes agressivos	Fendilhação; Delaminação; Desintegração e destacamento por corrosão de armaduras	MR1.1	MR1.2	MR1.3	MR1.4	MR1.5	MR1.6	MR1.7	MR1.8	MR2.1	MR2.2	MR2.3	MR6.1	MR6.2	MR6.3		
<u>Origem Mecânica</u>	Ações de origem biológica	Fendilhação; Desagregação; Manchas e alteração de cor	MR5.1	MR5.2	MR5.3	MR6.1	MR6.2	MR6.3										
	Impacto	Fendilhação; Destacamento; Esmagamento; Descasque e deformação	MR1.4	MR1.5	MR3.1	MR3.2	MR3.3	MR5.1										
	Sobrecargas excessivas	Fendilhação; Esmagamento e deformação	MR1.4	MR1.5	MR3.1	MR3.2	MR3.3	MR3.4	MR4.1	MR4.2	MR4.3	MR4.4	MR4.5	MR4.6	MR4.7			
	Assentamento de fundações	Fendilhação e deformação	MR1.4	MR1.5	MR1.6	MR3.1	MR3.2	MR3.3	MR3.4	MR4.1	MR4.2	MR4.3	MR4.4	MR4.5	MR4.6	MR4.7		
	Explosões	Fendilhação; Destacamento; Deformação e alteração de cor	MR1.4	MR1.5	MR3.1	MR3.2	MR3.3	MR5.1										
<u>Origem Eletroquímica</u>	Vibrações	Fendilhação e destacamento	MR1.4	MR1.5	MR3.1	MR3.2	MR3.3	MR5.1										
	Carbonatação do betão	Fendilhação; Delaminação e manchas de ferrugem	MR1.1	MR1.2	MR1.3	MR1.4	MR1.5	MR1.6	MR1.7	MR1.8	MR 2.1	MR 2.2	MR 2.3	MR 2.4				
	Correntes parasitas		MR 7.1	MR 7.2	MR 7.3	MR 7.4	MR8.1	MR8.2	MR8.3	MR 9.1	MR 10.1	MR 11.1	MR 11.2	MR 11.3				
	Cloretos no betão e no exterior	Fendilhação; Delaminação	MR2.1	MR2.2	MR2.3	MR2.4	MR8.1	MR8.2	MR8.3	MR 9.1	MR 10.1	MR11.1	MR11.2	MR11.3				
			MR 1.1	MR 1.2	MR 1.3	MR 1.4	MR 1.5	MR 1.6	MR 1.7	MR 1.8	MR 2.1	MR 2.2	MR 2.3	MR 2.4	MR 7.2	MR 7.5	MR 8.1	
			MR 8.2	MR 8.3	MR 9.1	MR10.1	MR 11.1	MR 11.2	MR 11.3									

Quadro 3 – Correspondência dos métodos às diversas causas e sintomas existentes

4.3.Trabalhos preparatórios a adotar antes da aplicação do método escolhido

Após a escolha do método adequado para concretizar o princípio, ou seja, a estratégia de intervenção, escolhem-se os trabalhos preparatórios a executar na superfície do betão, com o intuito de a preparar para receber a intervenção de reparação. Para isso, há que ter em atenção alguns aspetos que podem ser limitadores (Lapa, 2008):

- Se a superfície está suficientemente resistente para aguentar os métodos de preparação previstos;
- Se o dono de obra não aceitar ruídos e detritos, originados pelos métodos de preparação, bem como vibrações, poeiras e águas;
- Se os materiais a aplicar são incompatíveis com o substrato existente;
- Se, para a recolha dos detritos, há acessibilidade adequada ao método escolhido.

Na parte 10 da NP EN 1504, encontra-se uma linha orientadora sobre o conjunto de trabalhos de preparação a aplicar antes da intervenção. Entre esses trabalhos, estão a limpeza do betão, a aderência entre materiais, a remoção de betão e a preparação do aço.

➤ Limpeza de betão:

Este tipo de preparação da superfície consiste na limpeza do betão antes do início das reparações e, para isso, tem-se em conta dois importantes cuidados que englobam e definem como o betão se encontra momentos antes do início da aplicação do método (NP EN 1504-10, 2008):

- Não existir nenhuma sujidade, por exemplo pó ou pequenos detritos, que interfira na aderência entre a base antiga e o novo material a aplicar;
- A superfície tem de permanecer limpa e protegida até ao início da intervenção, mesmo que esta não tenha lugar nos instantes seguintes.

Existem vários tipos de sujidades e de cuidados para a sua remoção. Nos casos em que a superfície do betão esteja com gorduras e óleos, procede-se à remoção dos mesmos com auxílio de detergentes químicos; no caso de sujidade extrema, tem de se proceder à remoção dos detritos através de ácidos em soluções diluídas em água⁶. Após a aplicação de soluções

⁶ Esta aplicação não será utilizada em casos que o recobrimento seja muito reduzido ou próximo de juntas de dilatação.

mais agressivas, serão utilizados jatos de água e de areia, jatos de ar comprimido ou jatos de vapor.



Figura 30 – Aplicação de jato de água para limpeza do betão; cidadesaopaulo.olx.com.br

➤ Aderência entre materiais:

Na preparação da superfície, há que garantir uma perfeita ligação entre o material existente e o material novo.

Esta condição baseia-se primeiro, na conformidade entre materiais e, de seguida, no tipo de rugosidade dada ao betão. A técnica mais conhecida é a da utilização do martelo de agulhas, mas também se pode recorrer a um jato de areia ou de limalha de aço.



Figura 31 – Martelo de agulhas para criar rugosidade no betão; www.perfectool.pt

Se for o caso, antes da secagem por completo de argamassas novas, podem-se criar irregularidades com a massa ainda fresca. Há que ter em atenção que, nestas situações, e quando se está perante a aplicação de uma camada de argamassa inferior a 50 mm, se utiliza um primário⁷ que ajude na ligação entre os dois materiais (Saraiva, 2007).

Ainda quanto à aderência entre materiais, faz-se referência ao processo de saturação da superfície, que não é previsto na NP EN 1504, mas que vem proporcionar igualmente uma melhor ligação entre diferentes superfícies. O humedecimento contínuo em paredes, vigas ou pilares pode ser assegurado através de uma mangueira furada de 150 em 150 mm, que funciona como um sistema de rega (Souza & Ripper, 1998).

➤ Remoção de betão:

Todo o betão que esteja fendilhado, delaminado ou degradado tem de ser removido para uma melhor eficiência do método a aplicar. Na superfície em causa, essa remoção tem de ser contida, de modo a manter a estabilidade da estrutura, assim como a limitar os custos.

Para isso existem regras a cumprir, de âmbito geral e específico, que é importante referir (NP EN 1504-10, 2008):

- Remoção do mínimo de betão necessário, sem pôr em causa a estrutura do edificado; em casos extremos proceder ao seu escoramento;
- Profundidade da remoção, no mínimo igual à da carbonatação ou da ação dos cloretos;
- Nas situações mais desfavoráveis a remoção do betão em cerca de 15 mm; no caso de penetração de cloretos, remoção de 20 mm para além das armaduras e 100 mm para cada lado da zona afetada;
- Corte de betão com ângulo compreendido entre 90° e 135°.

Cumprindo as regras dispostas, dispõe-se de vários métodos de remoção de betão, que diferem no custo, no impacto ambiental, no nível de ruídos, nas vibrações, nos danos causados ao betão periférico e na quantidade a remover (NP EN 1504-10, 2008):

- Remoção por corte, que consiste em cortar o betão através de serras mecânicas;
- Remoção por esmagamento, através de martelos hidráulicos, marretas ou picaretas, sendo o processo menos dispendioso e de mais fácil acesso em obra;
- Remoção por impacto de elementos exteriores;
- Remoção por explosão;

⁷ Resinas ou caldas de cimento

- Remoção por indução de fendilhação, que consiste na utilização de químicos que provocam a fendilhação e delaminam o betão a remover;
- Remoção por abrasão, como se de um polimento se tratasse, através de lixadeiras portáteis ou máquinas de polir;
- Remoção com jato de água, o qual se costuma utilizar em zonas em que o betão se encontra frágil.

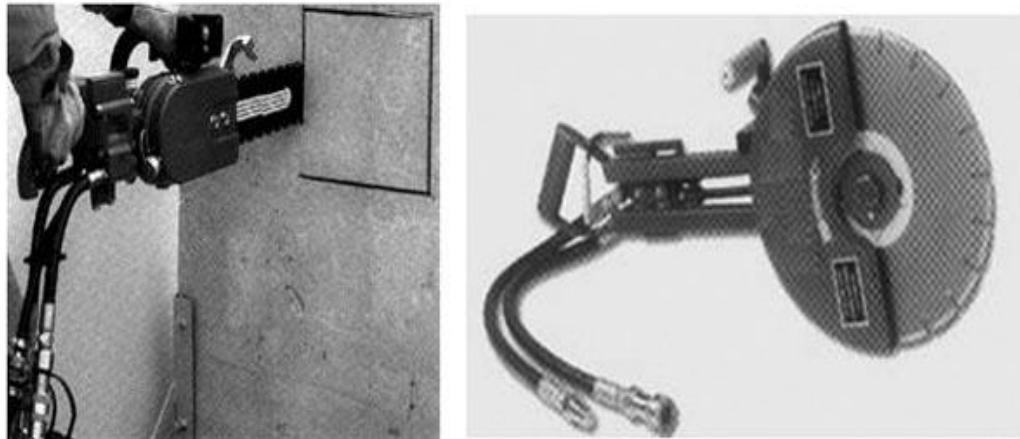


Figura 32 – Remoção de betão por corte; construironline.dashofer.pt



Figura 33 – Remoção de betão por esmagamento; construironline.dashofer.pt

Após a intervenção com qualquer um destes métodos de remoção de betão, procede-se a uma sequência de limpeza de betão, envolvendo o jato de areia, o jato de ar comprimido e o jato de água.

➤ Preparação do aço:

A limpeza do aço é uma das ações exigidas em muitos dos métodos de reparação, quando a armadura se encontra corroída. O processo de limpeza de um varão envolve as seguintes ações:

- Remoção do betão envolvente do varão corroído;
- Remoção completa da ferrugem, assim como de qualquer outra sujidade que impeça a boa ligação entre o betão e o aço;
- Limpeza de todo o perímetro do varão sem exceções;
- Proteção do varão até à aplicação de novo betão ou da argamassa escolhida;
- Limpeza e remoção dos detritos provenientes do trabalho sem afetar o betão ou o ambiente em volta;
- Limpeza dos varões corroídos, devido à contaminação por cloretos com jato de água (NP EN 1504-10, 2008).

O processo de limpeza utilizado para remover a ferrugem, difere conforme se trata de pequenas ou de grandes extensões de intervenção.

Em pequenas extensões, adota-se uma limpeza manual com esfregão de aço ou por meio de uma escovagem mecânica, seguida de jato de ar comprimido para limpeza de pequenas sujidades.



Figura 34 – Escovagem mecânica; construironline.dashofer.pt

Em grandes extensões, tem de se proceder à utilização de jato de areia húmida ou de jato de água, embora este não seja muito recomendável devido à introdução de água e humidade num meio já corroído.

Após a identificação dos quatro métodos de preparação da superfície, passa-se para a aplicação do método escolhido. No capítulo seguinte expõem-se os métodos práticos a utilizar no combate à corrosão de armaduras, essencialmente para a corrosão por carbonatação.

5. Reparação de betão armado afetado pela corrosão das armaduras induzida pela carbonatação do betão

Neste capítulo apresentam-se algumas das principais técnicas de reparação, prevenção e tratamento do betão armado, destacando o problema da corrosão das armaduras, resultando da carbonatação do betão.

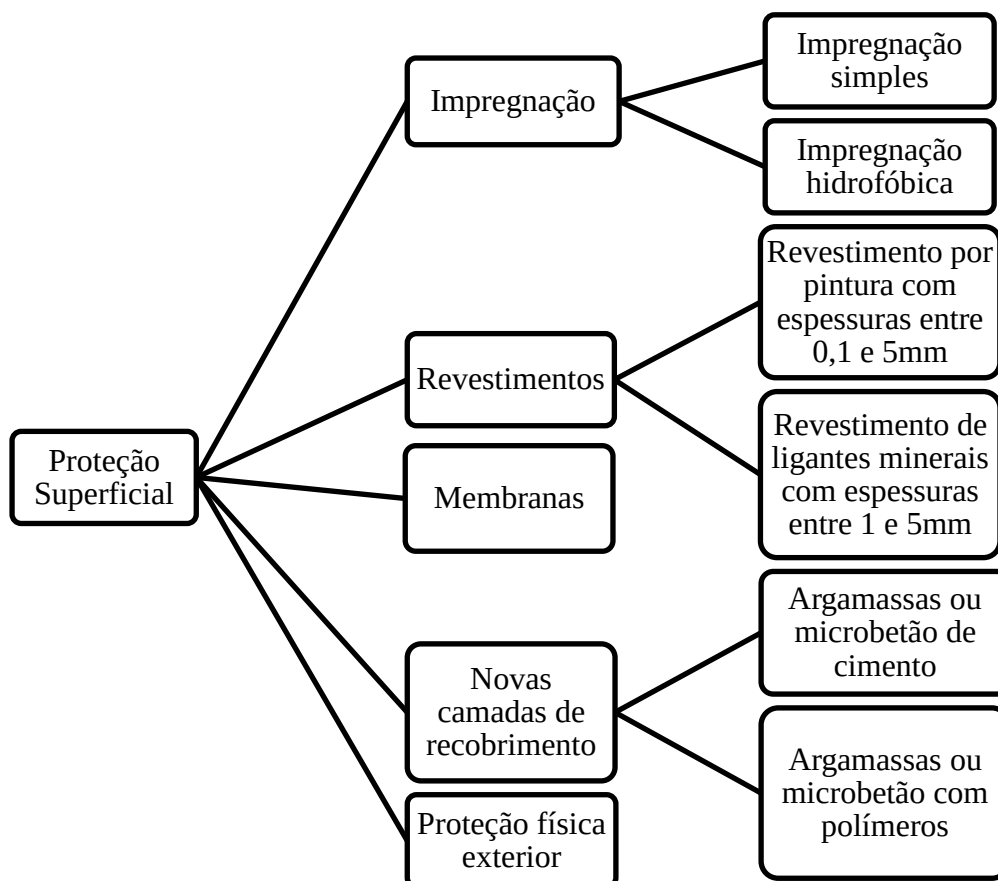
Tal como nos capítulos anteriores, existem diferentes métodos de reparação e prevenção que correspondem a diferentes causas de deterioração. Algumas técnicas resolvem vários problemas distintos como é o caso da utilização do revestimento superficial, o qual resolve causas físicas, químicas e eletroquímicas, onde se destaca a carbonatação.

5.1. Proteção superficial da estrutura contra a carbonatação do betão

As técnicas de proteção superficial procuram retardar a degradação da superfície de betão armado e evitarem o seu contacto com o ambiente envolvente.

Estas técnicas são usadas em edifícios recentes para prevenção da deterioração química ou física e da corrosão eletroquímica das armaduras; em edifícios antigos, para se reforçar o recobrimento deteriorado, de forma a suportar a agressividade do ambiente.

Distinguem-se cinco tipos de técnicas de proteção superficial contra a carbonatação e, em algumas dessas técnicas, surgem diferentes tipos de utilização de materiais, conforme se pode ver no esquema 5.



Esquema 5 – Métodos de proteção superficial do betão

5.1.1. Impregnação

É a técnica que consiste em tornar o betão menos poroso e repelente à água de forma a limitar o acesso de agentes agressivos, como CO_2 , na superfície da estrutura, e aumentar a sua resistência física sem alterar o aspeto estético, pois não existe aumento de espessura, nem alteração de cor. Este tipo de proteção superficial inclui dois tipos de aplicação que impregnam e penetram a superfície.

- A impregnação simples define-se pela redução dos poros do betão, preenchendo-os total ou parcialmente, através de resinas sintéticas⁸ que endurecem por reações químicas no interior dos poros. Este bloqueio é eficiente na restrição de iões cloreto em solução e dificulta imenso a entrada de vapor ou gases como CO_2 , o que diminui a velocidade da carbonatação;

⁸ Tintas acrílicas ou epoxídicas de baixa viscosidade para facilitar a penetração

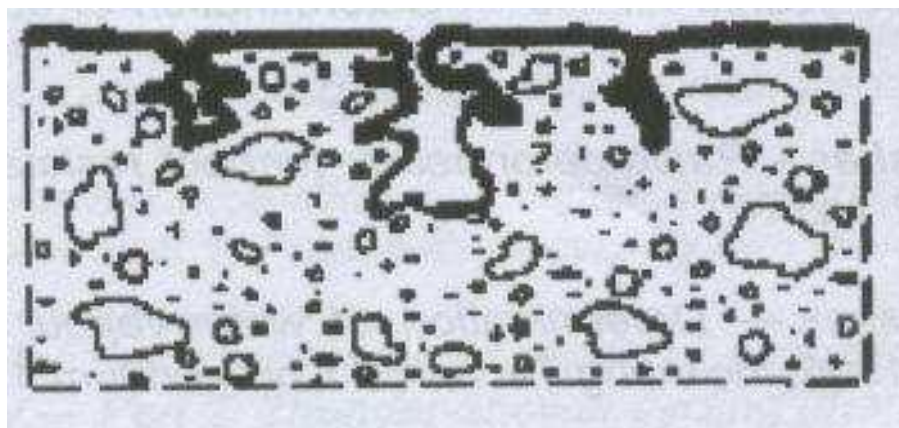


Figura 35 – Método de impregnação simples (NP EN 1504-2, 2005)

- A impregnação hidrofóbica aplica-se através de produtos como silanos ou siloxanos, que criam uma película fina de espessura entre 0,1 mm e 0,5 mm, o que origina uma superfície repelente em relação à água, pois esta deixa de ser absorvida por capilaridade, mas os poros continuam disponíveis para transporte de gases. Esta diminuição de água nos poros, coincidente com o livre-trânsito dos gases, o que pode fazer com que a velocidade de carbonatação aumente e se continue a dar (Saraiva 2007). Este método não é o mais apropriado em casos de carbonatação.

O modo de aplicação destas duas vertentes de impregnação pela NP EN 1504 tem de respeitar temperatura máxima e mínima no momento da aplicação; o grau de humidade existente no betão tem de ser quase nulo e o modo de aplicação de baixo para cima.

Em relação à aplicabilidade desta técnica para combate à corrosão das armaduras, dos métodos referidos no capítulo 4, distingue-se o MR1.1, MR 1.2, MR2.1, MR2.2 e MR6.2.

5.1.2. Revestimentos

Esta técnica também inclui dois modos de aplicação, que reduzem a porosidade e permeabilidade da superfície de betão; é diferente da anterior, pois nesta a quantidade de material usado pode ser maior, aumentando a espessura do elemento (Sousa, 2008).

- O revestimento por pintura, como o próprio nome indica, consiste em aplicar várias demãos de tinta ou verniz, com espessura entre 0,1 e 5 mm. Para o combate à carbonatação são escolhidas as tintas acrílicas, pois estas limitam o acesso de CO_2 e de oxigénio ao interior da estrutura, ao contrário das tintas epoxídicas, que são especialmente utilizadas na limitação do teor de cloretos;

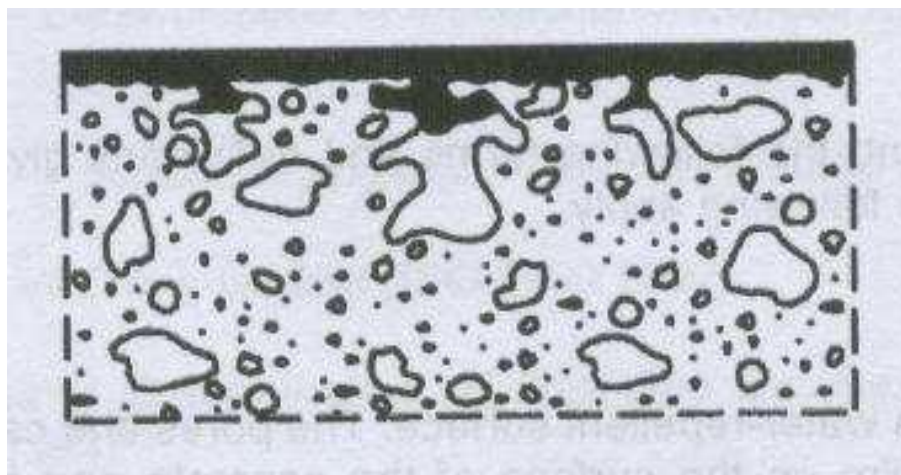


Figura 36 – Método de revestimento por pintura (NP EN 1504-2, 2005)

- O revestimento de ligantes minerais possui na sua composição uma elevada presença de inertes e os ligantes minerais mais usados são o cimento, a cal e os polímeros. Cada um destes ligantes possui características importantes para evitar a carbonatação, como a baixa permeabilidade que o cimento confere; a redução da retração e da formação de fendas devido à cal; a impermeabilização da superfície e resistência a ataques químicos através dos polímeros. Este tipo de revestimento possui uma espessura entre 1 e 5 mm e apresenta uma enorme capacidade física para selar e cobrir fendas ativas (Rodrigues, 1998).

A sua aplicação tem em conta a temperatura ambiente, a humidade do betão e do ambiente e a velocidade do vento; há que aplicar uma primeira camada de revestimento de espessura mínima, que sirva de primário às camadas posteriores que serão aplicadas com rolo, *spray* ou pincel.

Em relação à aplicabilidade desta técnica para combate à corrosão das armaduras, dos métodos referidos distinguem-se o MR1.3, MR2.3 e MR6.1.

5.1.3. Membranas

Este tipo de proteção superficial é especialmente caracterizado pela sua impermeabilização e extrema flexibilidade, sendo habitualmente utilizado em casos de grande pressão hidrostática e condições quimicamente agressivas.

Normalmente de origem betuminosa, asfáltica ou cimentícia, estas membranas costumam ser de espessura superior a 3 mm e, devido à sua capacidade para acompanhar os

movimentos de dilatação e contração do betão, evitam a penetração de água e de contaminantes como água, CO₂ e outros gases.



Figura 37 – Método de aplicação de membrana asfáltica

A sua aplicação apenas tem cuidados ao nível da verificação prévia da existência de humidade no betão, antes da aplicação da membrana, para não se correr o risco de formação de bolhas (Saraiva, 2007).

Em relação aos métodos a aplicar no combate à corrosão das armaduras, os distinguidos são o MR1.4, MR1.8, MR6.1 e MR9.1.

5.1.4. Novas camadas de recobrimento

O uso de uma nova camada de recobrimento com base cimentícia ou polimérica pode restituir a proteção às estruturas de betão armado. Este recobrimento pode ir de 5 mm a 60 mm e quando atinge valores a rondar os 20 mm ou superiores, convém ser usado microbetão para um melhor acompanhamento da fendilhação.

Esta proteção tem por objetivo melhorar a capacidade de drenagem das águas acumuladas à superfície e diminuir a vulnerabilidade da mesma aos agentes agressivos exteriores.

- A argamassa ou microbetão de cimento está destinada ao melhoramento da resistência mecânica da superfície, o que significa que não se recorre a esta técnica, quando se trata de deteriorações químicas ou de fendas na estrutura.



Figura 38 – Método de aplicação de microbetão; cm-viseu.pt

- A argamassa ou microbetão com polímeros contém cimento misturado com látex ou com epóxi e a sua espessura varia entre 5 e 50 mm. A vantagem desta técnica é a garantia de uma melhor resistência química do betão, assim como uma maior elasticidade e menor permeabilidade. O látex em particular possibilita baixa relação A/C, menor fendilhação, menor porosidade e a diminuição de permeabilidade da argamassa à água e ao CO₂, o que é ideal para o combate à carbonatação (Saraiva, 2007).

Na utilização desta técnica tem-se em atenção a limpeza da superfície e a criação de alguma rugosidade para assegurar aderência entre o existente e o novo. As camadas serão finas e aplicadas por fases para garantirem uma boa compactação, de modo a se evitarem bolhas de ar.

Em relação aos métodos a que se aplica esta técnica no combate à corrosão das armaduras, distinguem-se os MR2.4, MR6.1 e MR7.1.

5.1.5. Proteção exterior

Este tipo de técnica é conseguido através de elementos físicos exteriores à superfície de betão como painéis de betão armado prefabricado, painéis de fibra de vidro, painéis metálicos ou de madeira. Esta técnica confere uma proteção a agentes agressivos que penetrem no betão por absorção, tais como a água e os gases provenientes do ambiente envolvente.



Figura 39 – Aplicação de painéis de betão prefabricado; www.farcimar.pt

É uma técnica com uma rapidez e facilidade de aplicação enorme, mas que em contrapartida provoca impacto na estética da estrutura e esconde sinais de envelhecimento ou deterioração da mesma (Sousa, 2008).

Os métodos que se distinguem nesta técnica são o MR1.7. e MR2.4.

5.2.Reparação e prevenção de betão deteriorado por carbonatação

A progressão da carbonatação no betão conduz à corrosão das armaduras, o que origina fissuração na superfície do betão e por vezes até delaminação do mesmo. O betão deteriorado por corrosão das armaduras induzida por carbonatação, pode ser reparado através da utilização de várias argamassas e evitado pela prevenção através do tratamento de fissuras e fendas.

5.2.1.Reparação por utilização de argamassas

No caso corrente de delaminação do betão devido à corrosão eletroquímica das armaduras em betão carbonatado, recorre-se à colocação de argamassa ou de microbetão, técnicas também usadas na proteção superficial como recobrimento.

Os mesmos métodos são utilizados para se evitar uma progressão rápida da corrosão das armaduras, o que poderia conduzir à perda de secção dos varões por completo.

Para o caso específico da carbonatação, utiliza-se a argamassa ou microbetão com polímeros, sejam eles o epóxi ou o látex. As suas características, já referidas anteriormente,

são as ideais para o combate à carbonatação, devido à resistência que proporcionam ao betão, à menor permeabilidade e portanto menor fendilhação e porosidade.

A única diferença para a técnica da proteção superficial a ter em conta, é a preparação da superfície pois não se está a proteger, mas sim a reparar uma zona já deteriorada por carbonatação.

No caso da delaminação do betão, as armaduras são cuidadosamente verificadas após a remoção de ferrugem, para se perceber se perderam secção significativa. Se isso se verificar, tem de se proceder ao reforço da armadura, através de novos varões com comprimento igual à zona que perdeu secção, acrescido do comprimento de emenda para cada lado (Saraiva, 2007). Há que ter em conta a escolha adequada dos novos varões, sendo normal a escolha recair sobre os varões de aço inox ou sobre a proteção dos varões escolhidos com revestimento anticorrosivo aplicado em obra.

O processo simplificado de reparação da zona deteriorada por carbonatação é descrito da seguinte forma (NP EN 1504-10, 2008):

- Identificar as zonas deterioradas,
- Remover o betão delaminado ou carbonatado,
- Limpar a corrosão do aço e da superfície de betão em causa,
- Substituir os varões de aço necessários,
- Aplicar produto anticorrosivo nos varões,
- Aplicar um primário ou saturar a superfície com água antes da aplicação da argamassa,
- Aplicar a argamassa ou microbetão de polímeros.

Os métodos de intervenção a que se aplica esta técnica são o MR3.1, MR3.2, MR3.3 e MR7.2.

5.2.2.Prevenção por tratamento de fissuras e fendas

O objetivo deste tratamento passa por escolher adequadamente o material e o método a utilizar após a identificação do tipo de fissura e sua origem, com o objetivo principal de melhorar a durabilidade da estrutura de betão armado e a prevenção do ambiente corrosivo. Vários tipos de fissuração podem ser observados visualmente e, para ajudar a apurar a origem da fissura, podem ser realizados ensaios que determinam a causa de fissuração.

Quando na superfície de betão surgem manchas de ferrugem, fissuração horizontal no recobrimento e fendas com intervalo definido, conclui-se que existe corrosão das

armaduras provocadas pela frente de carbonatação, o que pode ser confirmado pelo ensaio com recurso à fenolftaleína (Simas, 2007).

Após revelada a causa da fendilhação da superfície de betão, recorre-se ao tratamento por injeção e selagem das fissuras e fendas.

➤ Injeção de fissuras:

Esta técnica pretende garantir a vedação de fissuras passivas⁹ ou ativas¹⁰, a líquidos ou gases existentes no ambiente envolvente, com um material resistente mecanicamente e quimicamente que se molde no espaço formado pela fissura.



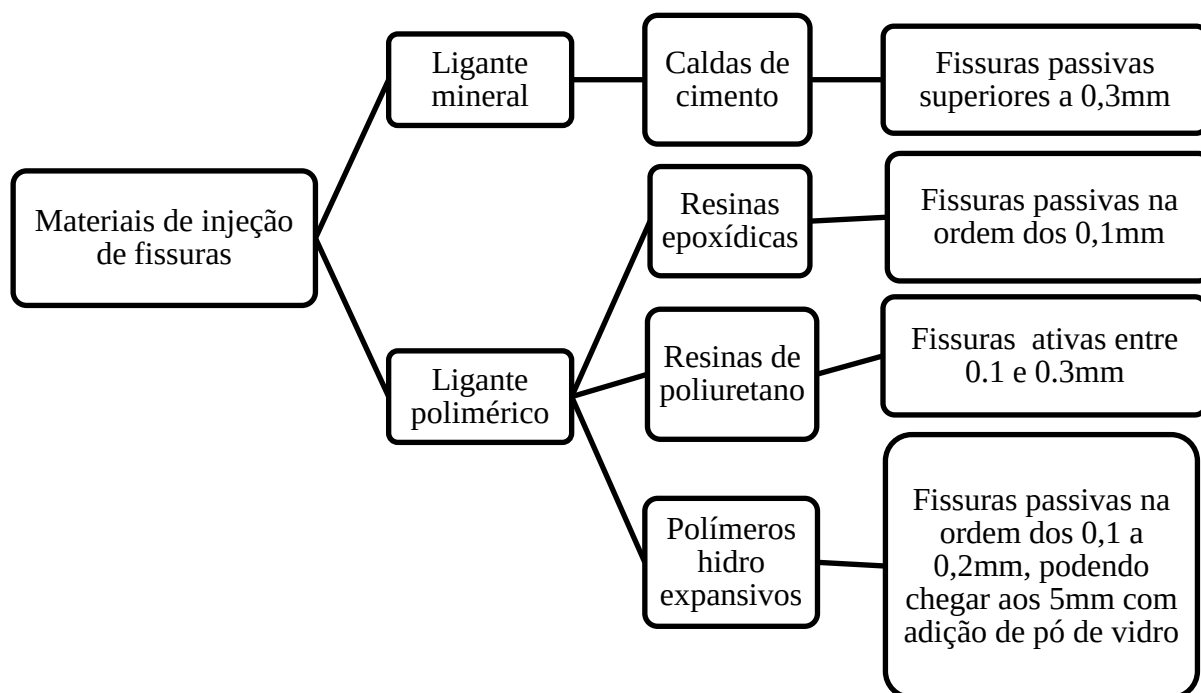
Figura 40 – Injeção de fissuras em laje; <http://mundodaimpermeabilizacao.blogspot.pt/>

Os produtos geralmente usados para este tipo de intervenção têm características distintas e são as caldas de cimento, as resinas epoxídicas ou de poliuretano, e os polímeros hidro expansivos:

- As caldas de cimento são pouco flexíveis e pouco fluidas, mas são produtos de baixo custo compatíveis com a estrutura de betão e duráveis;
- As resinas epoxídicas são rígidas, utilizadas em elementos muito fissurados e de custo mais elevado;
- As resinas de poliuretano são impermeáveis, mais flexíveis que as epoxídicas e garantem uma boa transmissão de forças em fissuras ativas;
- Os polímeros hidro expansivos são usados em fissuras muito finas, pois não têm problemas de retração e são bastante fluidos.

⁹ Fissuras passivas – fissuras que já não registam movimento e as causas da sua existência foram eliminadas.

¹⁰ Fissuras ativas – fissuras com amplitude de movimento, em que a causa da sua existência ainda não foi resolvida, como movimentações estruturais; assentamentos de fundações e variações térmicas (Sousa, 2008).



Esquema 6 – Métodos de injeção de fissuras

➤ Selagem de fendas:

Esta técnica consiste em selar fendas ativas, com abertura entre 10 a 30 mm, com grouts¹¹ que resistam quimicamente às agressões ambientais, sendo o método mais direto e rápido de selar uma fenda com dimensões assinaláveis. Em casos de medidas superiores a 30 mm, recorre-se à colocação de um cordão de poliestireno extrudido como um apoio do selante (Souza & Ripper, 1998). Esta técnica é usual nos dias de hoje e utilizada em situações de extrema urgência.

Qualquer destas técnicas exige a abertura prévia da fissura, a limpeza dos resíduos presentes na abertura, sendo a aplicação contínua e sempre no mesmo sentido.

Os métodos da norma EN 1504 a que se aplicam neste caso são o MR1.4, MR1.5 e MR 1.6.

5.3.Prevenção de corrosão eletroquímica das armaduras

Neste ponto descrevem-se algumas das técnicas atualmente mais usadas para a prevenção de corrosão das armaduras, ou seja, após a apresentação das técnicas de proteção superficial e reparação do betão já afetado, vão-se descrever as técnicas destinadas a prevenir que uma estrutura de betão armado seja afetada pela corrosão das suas armaduras.

¹¹ Caldas de cimento com areias finas para fendas de espessura assinalável.

A prevenção da corrosão das armaduras pode ser assegurada por uma das quatro formas mais usuais: por proteção dos varões de aço com revestimento, por aplicação de inibidores de corrosão no betão, pelo método da proteção catódica e pela monitorização do mecanismo de corrosão.

Estas técnicas podem evitar o desenvolvimento da corrosão do aço pela ação de agentes agressivos, como o caso do CO_2 , impedindo que a camada passiva desapareça, o aço se transforme num ânodo e se forme um campo elétrico que produza o hidróxido de ferro, deterioração já explicada nas causas eletroquímicas (V.d. 3.1.5).

5.3.1.Prevenção por revestimento das armaduras

No caso do revestimento das armaduras, a água existente no betão é isolada do varão através de revestimentos que funcionam como barreiras.

Quando a escolha recai sobre revestimentos com pigmentos ativos de potencial elétrico inferior ao do varão, estas trabalham como ânodos sacrificiais e deixam o aço protegido como cátodo (NP EN 1504-7, 2008). Um exemplo desses revestimentos com pigmentos mais usados é a galvanização a zinco e banho das armaduras em zinco fundido.

Outras soluções possíveis são os revestimentos epoxídicos e de *PVC* que funcionam como barreira, isolando o varão da água presente nos poros do betão. Após o isolamento, as zonas supostamente anodais não contactam com o eletrólito e o processo de corrosão não surge (NP EN 1504-7, 2008). Este método exige uma limpeza profunda do varão, ficando o revestimento em boas condições de resistência física.

Quando se utiliza qualquer uma destas soluções práticas, há que ter em conta a limpeza das armaduras e a aderência do revestimento aos varões, evitando-se contaminações do betão envolvente.

Os métodos a que se aplicam estas técnicas são o MR 11.1 e MR 11.2.

5.3.2.Prevenção por inibidores de corrosão

Esta técnica consiste em utilizar inibidores de corrosão misturados nas argamassas de reparação ou em aplicação direta nos varões de aço, para reduzir a velocidade de corrosão das armaduras. Este método é mais usual e eficiente em casos de contaminação do betão por cloretos e por isso não será desenvolvido neste trabalho.

5.3.3. Prevenção por proteção catódica

A proteção catódica consiste em reverter a corrente elétrica existente na estrutura de betão armado, ou seja, as armaduras passam a funcionar como cátodo e o metal sacrificado passa a ser o novo ânodo.

Existe por isso a proteção catódica passiva e ativa:

- A passiva consiste em instalar um ânodo sacrificial como o zinco ou o alumínio em ligação com o varão, precisando apenas de um ciclo de substituições periódicas devido à vida reduzida do ânodo;
- A ativa consiste em impor uma corrente externa à armadura da estrutura e embeber um ânodo como uma rede de titânio que gera um campo elétrico negativo. Esta por sua vez exige uma instalação complexa e de uma manutenção regular.

Este método é usual e eficiente em casos de corrosão de armaduras induzida por cloretos ou devido à contaminação do betão por cloretos, pelo que não interessa aprofundar este tipo de técnica na presente dissertação.

5.3.4. Prevenção por monitorização

Durante a vida útil de uma estrutura de betão armado ou após a aplicação de métodos de reparação, proteção e tratamento de betão deteriorado, pode ser necessária a monitorização do mecanismo de corrosão das armaduras.

Esta técnica consiste em instalar sensores no interior do betão, que permitam fornecer informações sobre os parâmetros que influenciam a corrosão das armaduras, desde o seu comportamento durante a vida útil, até ao desempenho das reparações.

Este tipo de monitorização pode detetar os seguintes aspetos, através da instalação de sensores (Appleton & Costa, 2013):

- Velocidade de corrosão das armaduras através da aplicação de elétrodos de referência;
- Resistividade do betão através da aplicação de elétrodos metálicos;
- Penetração da humidade através da aplicação de sensores eletrónicos;
- Penetração de gases através da aplicação de elétrodos metálicos ou de referência;
- Medição do pH do meio através de elétrodos de pH.

O objetivo desta monitorização é de avisar previamente sobre processos de deterioração que levam à corrosão das armaduras por carbonatação, nas várias etapas de uma estrutura de betão armado (Appleton & Costa, 2012):

- Vida útil: Os sensores são colocados durante a construção da estrutura e a sua localização depende do ambiente envolvente e do tipo de estrutura;
- Reparações locais: Os sensores são colocados nas zonas reparadas e nas adjacentes, de modo a obter informações sobre a barreira que separa uma zona deteriorada de uma zona sã;
- Proteções superficiais: Os sensores são aplicados na superfície e informam especificamente sobre questões de humidade, resistividade e penetração de gases;
- Realcalinização (método aprofundado no ponto seguinte): A monitorização é feita através da medição da alcalinidade do betão por eléctrodos de pH e medição do potencial das armaduras, de modo a acompanhar a velocidade de carbonatação.

5.4.Tratamento de betão contaminado por processo eletroquímico

Existem diversas técnicas de tratamento eletroquímico e as três mais praticadas são:

- A proteção catódica que é também uma técnica de prevenção contra a corrosão das armaduras, mas que não se vai desenvolver neste trabalho por ser um método de tratamento adequado à eliminação de iões cloreto;
- A dessalinização que é um processo semelhante à realcalinização, especializada somente à remoção eletroquímica dos iões cloreto;
- A realcalinização do betão carbonatado, a qual consiste num método não destrutivo, que permite que o betão carbonatado volte a ter um ambiente alcalino suficientemente estável para restaurar e manter a camada passiva das armaduras, de modo a evitar a sua corrosão.

Estes métodos consistem na alteração dos potenciais das armaduras, com a vantagem de se manter o betão não delaminado, tendo em conta que, por vezes, algumas contraindicações podem surgir como o desenvolvimento de reações álcalis-agregado por migração de iões alcalinos. A presença de mão-de-obra especializada que saiba aplicar o

método, planeá-lo, projetá-lo e monitorizá-lo é imprescindível à garantia da eficácia do sistema (Appleton & Costa, 2012).

➤ Método para aumento de pH do betão (EN 14038-1, 2014):

No âmbito da realcalinização do betão, existem três métodos para combater a carbonatação do mesmo:

- Difusão¹² de substâncias alcalinas a partir de materiais cimentícios sobre o betão carbonatado;
- Absorção por capilaridade de soluções alcalinas;
- Difusão de reservas de álcalis de betão não carbonatado.

Quando se trata de uma difusão de álcalis no interior do betão, a ideia é aproveitar a reserva existente no interior do mesmo e não na sua frente carbonatada, de modo a que a concentração de álcalis prossiga lentamente para a camada de recobrimento, subindo o valor do pH e restituindo a camada passiva das armaduras. Na mesma linha de pensamento e se o interior do betão não tiver uma reserva suficiente para tal migração, podem-se introduzir álcalis por capilaridade, ou seja, uma solução alcalina absorvida na superfície do betão por capilaridade, resultando igualmente numa subida do valor do pH (Saraiva, 2007). Estas duas técnicas não são muito usuais em Portugal, devido ao tempo de execução durar entre 3 a 7 semanas; a eficácia total da solução dura cerca de 1 ano e de o seu custo é elevado.

A realcalinização eletroquímica do betão carbonatado acrescenta uma proteção à armadura, aumentando a alcalinidade do meio sem se remover o betão são, ou seja, aplica-se uma corrente temporária num circuito fechado, em que o cátodo é a armadura (polo negativo) e o ânodo externo é uma malha metálica seca (polo positivo) embebido num eletrólito, aplicando uma argamassa de proteção superficial ‘*a posteriori*’.

¹² Passagem das moléculas do local de maior concentração para o local de menor concentração através da saturação da superfície.



Figura 41 – Aplicação de malha de aço (ânodo) e argamassa de cimento na realcalinização do betão; www.stap.pt

Podem-se aplicar vários tipos de eletrólitos, como o carbonato de sódio, o carbonato de potássio ou o hidróxido de lítio (Appleton & Costa, 2012). Estes penetram no betão através da sua solução alcalina, em direção às armaduras por electro osmose¹³ que gera iões hidroxilo (OH-) devido à eletrólise da água com os eletrões, o que aumenta o pH no betão e regenera a camada passiva dos varões de aço (Catarino, 2010).

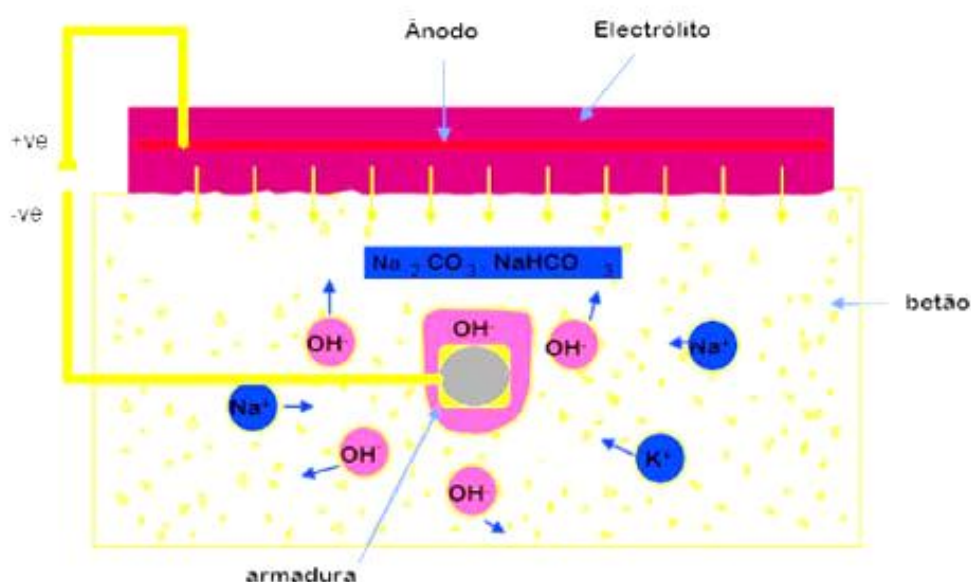
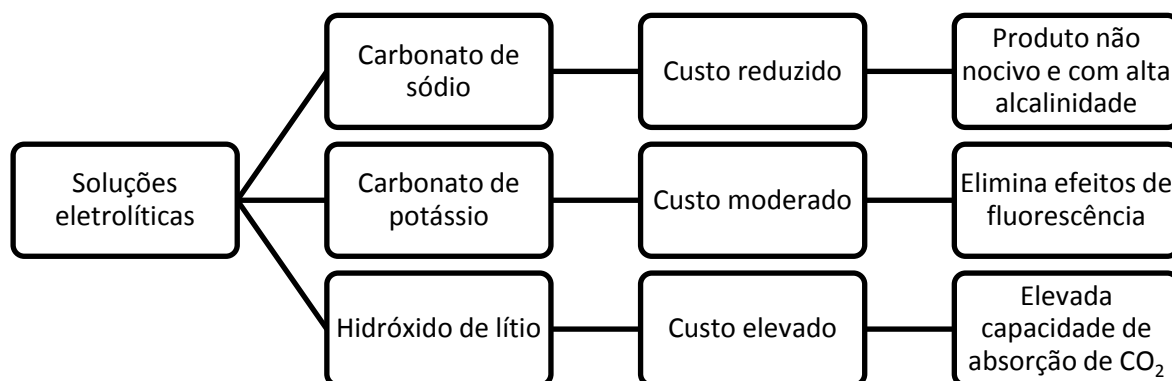


Figura 42 – Processo de realcalinização do betão; construironline.dashofer.pt

¹³ Movimento induzido por um potencial exterior e aplicado através de um material poroso como o betão.

Para se fazer a melhor escolha, tendo em conta custos e características desejadas apresenta-se o esquema 7:



Esquema 7 – Soluções eletrolíticas: custos e aplicações (Appleton & Costa, 2012)

Esta técnica apenas é garantida se existir continuidade entre varões, separação entre o aço e os ânodos externos e se aplicar uma argamassa de recobrimento após a colocação da malha que representa o ânodo.

A duração deste tratamento ultrapassa as três semanas, que é o tempo pretendido para se retirar o ânodo exterior. Como já se disse, é o tratamento ideal para estruturas de betão armado carbonatadas e é ideal para envolventes em que não se pode recorrer a pinturas, demolições ou argamassas.

Os métodos em que se aplica esta técnica são o MR7.3. e MR7.4.

6. Exemplos de obras de betão armado deteriorado com exemplos práticos dos métodos intervencionados

Verifica-se que a proteção ou reparação de estruturas de betão armado é essencial nos dias de hoje e a necessidade de se proceder de uma forma correta e especializada é muito importante nos métodos a utilizar.

Para isso existem empresas e técnicos especializados que lidam sistematicamente com este tipo de problema.

De seguida apresentam-se exemplos de intervenções em obras deterioradas, visitadas pelo autor, com recurso aos métodos abordados nos capítulos anteriores. O edifício na Rua de São Bento e a Igreja na Av. Berna com intervenções recentes e presenciadas pelo autor, enquanto a Escola José Gomes Ferreira em Benfica, é estudada pelo autor, aproximadamente 7 anos após a intervenção, com o intuito de se avaliar o desgaste e o estado dos trabalhos de reabilitação após tal período de tempo.

➤ Casos visitados:

- Edifício com betão de uma laje carbonatado na Rua de São Bento, em Lisboa;
- Igreja N.S. Fátima na Av. Berna com fissuração;
- Escola José Gomes Ferreira em Benfica.

6.1.1. Laje de um edifício situado na Rua de São Bento, em Lisboa

Esta obra consiste num edifício corrente de betão armado situado no centro de Lisboa – Rua de São Bento, que foi construído há mais de 20 anos (data incerta), é utilizado como auditório, sendo o autor de projeto desconhecido.

Uma das suas lajes de betão armado encontrava-se deteriorada e observam-se sintomas como a corrosão das armaduras, a delaminação do betão e a perda de secção de armadura em algumas zonas.

Estes sintomas dependem dos seguintes fatores apurados:

- O recobrimento das armaduras pelo betão era de cerca de 10 mm, no máximo, em toda a laje;

- A zona mais deteriorada e o ponto mais frágil da laje era a de atravessamento por uma conduta de ar condicionado, zona propícia à acumulação de humidade;
- Pontos de furação na laje que o antigo inquilino executou, de forma a suportar o teto falso nos varões de aço presentes na laje. Existiam assim, vários pontos de exposição do aço aos agentes agressivos, como CO_2 e humidade.



Figura 43 – Laje com corrosão de armaduras e delaminação do betão, 2013



Figura 44 – Laje deteriorada por acumulação de humidade na zona da conduta de ar condicionado, 2013

O empreiteiro tinha previsto executar ensaios para apurar a presença de carbonatação, mas estes não foram realizados, passando diretamente para os trabalhos de limpeza da superfície e reparação do betão, tendo em conta o que o projetista da obra definiu.

Na opinião do autor, é importante a execução de ensaios que confirmem a presença ou não de carbonatação ou de cloretos na peça de betão armado; com estes ensaios verifica-se a profundidade a que se encontra a carbonatação, permitindo que em certas zonas da laje, se proceda à remoção por completo do betão carbonatado existente, com recurso a uma nova projeção de betão ou argamassa, tal como refere a NP EN 1504.

O empreiteiro deduziu a partir de inspeção visual, que a carbonatação estava presente e executou uma limpeza da superfície de betão na parte inferior da laje, recorrendo à limpeza por jato de alta pressão e, procedeu à impermeabilização da parte superior da laje por membranas asfálticas, com execução de nova betonilha.



Figura 45 – Limpeza a jato de alta pressão nas zonas delaminadas, 2013

Após a preparação da superfície foi aplicado um inibidor de corrosão, um promotor de aderência e foi projetada a argamassa de reparação. Estes trabalhos estão descritos no mapa de quantidades fornecido pelo empreiteiro, do qual se transcreve:

➤ Reabilitação da laje deteriorada:

- *“Picagem e remoção de betão, na camada inferior da laje. Remoção da armadura com perda significativa de secção, incluindo o transporte e encaminhamento a destino final adequado dos resíduos, de acordo com o projeto de execução, com todos os trabalhos e materiais necessários. Considera-se incluído nos valores unitários o recurso a meios mecânicos e manuais conforme os elementos a desmontar assim o exijam;*
- *Fornecimento e aplicação de betão projetado C 25 / 30, de acordo com os pormenores de betão armado e do caderno de encargos, com todos os trabalhos e materiais necessários;*
- *Fornecimento e aplicação de revestimento de aderência e proteção de armaduras, tipo Sika Monotop 910 S, em duas demãos de 1 mm cada, tudo de acordo com os pormenores e caderno de encargos, com todos os trabalhos e materiais necessários.”*

Por vezes não são contabilizados certos trabalhos preparatórios, devido aos custos inerentes a esses serviços; o dono de obra confia na experiência do projetista e do empreiteiro em obra, para identificar a causa de deterioração e executar o método de intervenção mais adequado, mas corre-se o risco de, em poucos anos, começarem a surgir pontos reincidentes de deterioração.

Neste caso executou-se uma proteção superficial da laje superior através de membranas asfálticas e de uma nova camada de argamassa; fez-se o tratamento dos varões com *Sika Monotop 910 S* que, como se pode verificar na ficha técnica no Anexo I, faz referência à norma EN 1504, onde se transcreve: *“Camada de proteção preventiva da corrosão, nas armaduras (adequado para controlo das áreas anódicas – Princípio 11 da NP EN 1504-9) ”*; seguiu-se de uma nova camada de recobrimento por betão projetado, com aumento do recobrimento na parte inferior da laje.

Seguindo a metodologia até aqui apresentada, tem-se para este caso:

- Avaliação do estado estrutural da laje e dos riscos iminentes;
- Realização de ensaios para escolha do método de proteção contra a corrosão das armaduras, para determinação de existência de carbonatação ou de cloretos;
- Escolha dos métodos de reparação como o MR 3.1. ao MR 3.4, MR4.1, MR6.1 e MR 11.2;

- Limpeza da superfície de betão antes do início das reparações em ambas as partes da laje;
- Remoção de todo o betão que esteja fendilhado, delaminado ou degradado;
- Remoção do betão que esteja totalmente carbonatado e aplicação de uma nova betonagem;
- Limpeza do aço, que garanta a remoção da ferrugem e a remoção do betão carbonatado envolvente do varão corroído em qualquer zona da laje;
- Substituição de alguns varões sem secção em qualquer zona da laje;
- Tratamento dos varões com produto homologado, como o ‘Sika monotop 910 S’ na parte inferior da laje;
- Garantia de uma perfeita ligação entre o material existente e o novo a aplicar;
- Aplicação de nova camada de recobrimento através de betão ou argamassas, na parte inferior da laje;
- Aplicação de membranas asfálticas e nova betonilha na parte superior da laje, para prevenção de humidades que possam surgir.

Na opinião do autor, os trabalhos efetuados seguiram alguns dos passos referidos, ficando em falta os ensaios; ficou-se com a sensação de que a reparação não terá sido bem executada, uma vez que não se garantiu a substituição do betão carbonatado, por detrás das armaduras; pareceu existir falta de estudo do empreiteiro, de acordo com a NP EN 1504.

6.1.2. Igreja de N.S. Fátima, em Lisboa

A igreja de Nossa Senhora Fátima, datada de 1938, foi projetada pelo Arq. Pardal Monteiro, encontra-se em funcionamento desde a data da sua abertura e foi apenas reparada recentemente devido à existência de fissuração em todas as fachadas exteriores.

Verificou-se que a estrutura de betão armado, com aproximadamente 75 anos, apenas se encontrava fissurada, com poucos pontos de corrosão de armaduras e algumas oxidações pontuais. O recobrimento e a fina película de argamassa de acabamento pintada era, em quase todas as fachadas, suficiente para proteger as armaduras; o seu grau de exposição a agentes corrosivos era baixo. No que se refere à fissuração, é uma anomalia ocorrente em maior densidade nas áreas mais expostas à incidência solar, decorrendo da sujeição da fachada a amplitudes térmicas elevadas, como representado na figura 46.

O objetivo do autor é referir quais os processos adotados pelo empreiteiro em obra e desenvolver uma crítica positiva dos métodos e passos seguidos, adotando uma organização por tópicos, baseada na NP EN 1504 até aqui estudada.

No início da obra, foi investigada a presença de carbonatação e de cloretos no betão. Foi removido o revestimento do betão, sobre o qual foi aplicada fenolftaleína e o ensaio mostrou que o betão não se encontra carbonatado, conforme a figura 47. Vários ensaios foram feitos por vários pontos das fachadas, conforme se verifica na figura 48. A presença de cloretos foi verificada em amostras de pó recolhido pela furação no betão, que foram enviadas a laboratório para análise e o betão não se encontrava tão pouco contaminado por cloretos.

A principal preocupação era anular todos os pontos de corrosão e refazer essas partes de betão, e também prevenir este edifício de futuros pontos de corrosão do betão por carbonatação, através da entrada de CO₂ e humidade pelas fissuras já existentes em toda a extensão do edifício.



Figura 46 – Fissuração presente nas fachadas, 2013

Alguns dos pontos de corrosão, geralmente em partes da fachada não estruturais como na zona perimetral das janelas e nas ligações entre os painéis das janelas (figura 49 e 50), teve de se retirar o varão de aço e refazer a secção com a argamassa de reparação escolhida, a ‘*Mapegrout Tissotropico*’.



Figura 47 – Ensaio de fenolftaleína em obra, 2013



Figura 48 – Ensaio de fenolftaleína em várias partes da fachada ‘Alçado Sul Galeria’, 2013



Figura 49 – Pontos de corrosão de armaduras, 2013



Figura 50 – Reparação de fissuras em painéis de fachada, 2013

O caderno de encargos preconiza, no mapa de quantidades fornecido pelo empreiteiro (incluído no anexo II), um valor global para o tratamento de elementos em betão armado existentes, incluindo remoção de betão degradado, decapagem das superfícies das armaduras, aplicação de proteção anticorrosiva e de revestimento de recobrimento.

Para o efeito, foi feita a picagem do betão degradado com martelos elétricos de guilhos, seguida da decapagem manual das armaduras oxidadas com escovas de aço. Não se inibidores de corrosão nos varões devido a alguns receios de diferenciais elétricos, que podiam surgir entre a zona intervencionada e a perimetral.

A proteção e reposição de secção de betão foram feitas pela aplicação manual de argamassa de base cimentícia – *Mapegrout Tissotropico* da *Mapei* (Anexo II), com o efeito de reparação estrutural de betão.

De seguida, apresentam-se os métodos utilizados em obra pelo empreiteiro geral na reabilitação de fachadas e coberturas, seguindo a metodologia do projeto, do mapa de quantidades e da NP EN 1504:

- Avaliação do estado estrutural das fachadas e dos riscos iminentes;
- Realização de ensaios para escolha do método de proteção contra a corrosão das armaduras, para determinação de existência de carbonatação ou de cloretos;
- Escolha dos métodos de reparação tais como MR1.3, MR1.4, MR 3.1, MR 3.4, MR 5.1 e MR 6.1;
- Limpeza das superfícies de betão antes do início das reparações em todas as fachadas;
- Remoção de todo o betão que estava fendilhado, delaminado ou degradado, com recurso a martelos elétricos;
- Retirada de alguns varões sem secção nas zonas não estruturais;
- Decapagem manual das armaduras oxidadas com escovas de aço, garantindo a remoção da ferrugem do varão corroído em qualquer zona da fachada;
- Decapagem dos paramentos com jato de água;
- Marcação e reparação do betão degradado com *Mapegrout Tissotropico*;
- Aplicação de uma demão de argamassa '*Planitop 200*';
- Aplicação de rede de fibra de vidro '*Mapenet 150*';
- Aplicação de uma demão de '*Planitop 100*';
- Pintura da fachada com sistema '*Elastocolor*', da *Mapei*;
- Aplicação de uma demão de primário '*Malech*' com 5% de tinta '*Elastocolor*';

- Aplicação de três demãos de tinta ‘Elastocolor’.



Figura 51 – Aplicação de argamassa cimentícia e rede de fibra de vidro em fachada, 2013

Na opinião do autor cumpriram-se todas as normativas referentes aos passos a tomar, pois havia o conhecimento pelo empreiteiro da NP EN 1504, como a execução dos ensaios que determinaram a inexistência de carbonatação ou de cloretos; os tratamentos da superfície e picagem de betão, antes da aplicação do método escolhido; os métodos escolhidos que passaram pela reabilitação de certas partes da fachada com argamassa *Mapegrout Tissotropico*; a proteção e prevenção das fachadas que receberam duas camadas de argamassa *Planitop* intervaladas por rede de fibra de vidro, e uma proteção superficial com recurso a aplicação de tintas de base acrílica.

Em suma, o autor conclui que a única alteração que poderia haver neste modo de intervenção, estaria relacionada com a escolha das marcas de argamassas e dos produtos com base em custos, pois, a nível da metodologia, esta foi seguida de acordo com a normativa.

6.1.3. Escola José Gomes Ferreira, em Benfica

O último caso prático é referente à Escola José Gomes Ferreira, em Benfica, composta por seis edifícios: os edifícios ‘A’ a ‘E’ e o ginásio. O projeto é do Arquiteto Hestnes Ferreira, iniciado em 1975 e a sua construção concluída em 1980.

Os edifícios são agrupados por corpos estruturalmente independentes, como por exemplo, o edifício ‘A’ e ‘E’ constituídos por 1 corpo estrutural; edifício ‘B’ e ‘D’ por 2 corpos e o edifício C por 3 corpos estruturais.

De acordo com a informação obtida, a estrutura é constituída por lajes fungiformes, pilares quadrados com 0,40 m e as fundações são diretas por meio de sapatas. O recobrimento das armaduras é de 20 mm nas vigas, pilares e paredes; 30 mm nas faces em contacto com o terreno.

As fachadas dos edifícios são revestidas com painéis de betão armado branco aparente, betonados em obra (figura 53); não foi considerada qualquer função estrutural destes painéis de betão. O interior do edifício, ao contrário dos painéis exteriores, foi executado com betão armado aparente cinzento. Observa-se também, na cobertura de cada edifício, a utilização de elementos de betão branco aparente semicirculares, betonados em obra na sua posição definitiva (figura 54), com a função de guardas.



Figura 52 – Escola José Gomes Ferreira, 2003



Figura 53 – Aspeto geral das fachadas dos módulos; painéis exteriores, 1975-1980



Figura 54 – Peças semicirculares na cobertura betonadas em obra, 1975-1980

A referência a esta obra resulta do facto de no ano de 2003, ter sido executado um projeto de reabilitação das fachadas, devido a um acumular de anomalias em todas elas nos

cinco edifícios e no ginásio (que acabou por não ser intervencionado). O edifício é classificado como património arquitetónico e havia então o cuidado de se reabilitar e resolver todas as anomalias, mantendo a solução inicial.

O objetivo do autor é referir o processo desenvolvido aquando da intervenção nos edifícios e avaliar ao fim de 7 anos (após visita ao local), o estado das intervenções e o surgimento de novas ou recorrentes anomalias; o autor fez esta avaliação com base na NP EN 1504, norma que em 2003/2004 estava em elaboração e por isso não havia total conhecimento da mesma.

O primeiro ponto tido em conta pelo autor do projeto foi o levantamento de anomalias, através de inspeção visual e através de ensaios. Em várias zonas do corpo estrutural de betão aparente, procedeu-se a:

- Reconhecimento de anomalias por inspeção visual;
- Determinação da resistência do betão à compressão por meio de carotes e esclerómetro da Schmidt;
- Determinação da permeabilidade do betão ao ar e à água;
- Estimativa do teor de cloretos no betão;
- Levantamento do posicionamento, recobrimento e diâmetro das armaduras;
- Determinação da profundidade de carbonatação.

➤ Reconhecimento de anomalias por inspeção visual:

Identificaram-se todas as anomalias por inspeção visual; foram tipificadas e registadas em desenhos que contemplam as fachadas dos vários módulos de edifícios. Aí se descrevem as fissuras, as fissuras com betão solto, as pontas de varões à vista, a delaminação do betão e as armaduras expostas e, bem assim, as juntas de dilatação e os furos existentes nas fachadas.

Todas aquelas anomalias estão associadas, em todos os módulos dos edifícios, à carbonatação do betão e à corrosão das armaduras.

Foram também registados outros problemas estruturais, assentamentos de fundações e deficiência de manutenção / envelhecimento dos sistemas de impermeabilização das coberturas.

➤ Características mecânicas do betão aplicado em obra:

Executaram-se dois tipos de ensaios para avaliar as características mecânicas do betão, pelo meio da extração de carotes e pelo esclerómetro de Schmidt.

Foram ensaiadas 7 carotes e, estimando a sua resistência aos 28 dias de idade com recurso ao REBAP, o betão em obra seria um C16/20; com o esclerómetro foram realizados 9 ensaios, tratando-se de ensaios não destrutivos que avaliam a dureza superficial do betão em superfícies homogêneas; obtiveram-se valores que correspondem a um betão entre o C16/20 e C20/25.

➤ Permeabilidade do betão:

Nesta etapa foi determinada a permeabilidade do betão ao ar e à água, através do método de *Figg*¹⁴, o que identificou um betão com má capacidade de proteção às armaduras.

➤ Estimativa de cloretos no betão:

Em pontos distintos da obra, determinou-se a presença de cloretos nos elementos de betão, a qual deu valores muito baixos que não indicam indícios de contaminação. Foi concluído que a corrosão das armaduras se dá somente pela carbonatação do betão.

➤ Armaduras:

A deteção de armaduras revelou que os painéis exteriores de revestimento eram constituídos apenas por uma camada de armadura, varões de diâmetro reduzido e muito afastados. A espessura das peças de betão é de 80 mm nos painéis de fachada e o recobrimento das armaduras varia entre 15 mm e 70 mm, devido à ausência de espaçadores. Recorda-se que estes painéis não têm função estrutural.

➤ Profundidade de carbonatação:

A profundidade de carbonatação nas peças de betão aparente, das fachadas dos vários módulos, foi determinada através da extração de carotes e posterior utilização de fenolftaleína.

Na generalidade das situações, a profundidade de carbonatação era mais elevada na face exterior, mas a face interior, apesar de protegida, também registava carbonatação com valores significativos para peças interiores.

¹⁴ O método de Figg consiste em determinar um grau de permeabilidade, através da introdução de uma agulha hipodérmica, num furo perpendicular à superfície de betão.

Apresentam-se valores compreendidos entre 15 mm e 45mm de carbonatação, com uma maior frequência nos valores entre os 25 mm e os 35mm; valores excessivos para um betão com cerca de 20 anos de idade, onde facilmente se percebia que, num futuro breve, toda a peça de betão aparente estaria carbonatada (situações já encontradas pontualmente).



Figura 55 – Carotes extraídas dos alçados dos vários módulos com recurso à fenolftaleína, 2004

Depois da verificação visual das anomalias e dos resultados dos ensaios, retiraram-se conclusões sobre o estado da fachada de betão aparente e das peças semicirculares da cobertura.

O facto de se encontrar um betão muito permeável ao ar e à água, explica a maior facilidade de penetração de agentes agressivos, como o CO₂ e a água. Aliando este fator ao recobrimento baixo, ao reduzido diâmetro das armaduras e ao seu deficiente posicionamento, justifica-se que a frente de carbonatação fosse aumentando, apresentando em muitos casos a carbonatação total da peça e a consequente a corrosão das armaduras.

Na figura 56, percebe-se o estado das fachadas em muitos pontos dos 5 edifícios, realçando o destacamento do betão e a corrosão das armaduras; fatores causados pela perda de proteção das armaduras, devido às más características do betão e à sua carbonatação, agravada pelos baixos valores de recobrimento.



Figura 56 – Destacamento do betão e corrosão de armaduras nas fachadas, 2003

Após a identificação das anomalias e dos ensaios efetuados, conforme indica a NP EN 1504, seguiu-se a escolha dos métodos de reparação e do modo de intervenção nas fachadas dos cinco módulos da escola.

Os métodos escolhidos recaíram sobre a utilização de uma argamassa com espessura significativa que limitasse a propagação da carbonatação e da corrosão das armaduras, mas que ao mesmo tempo, mantivesse a textura e aparência da peça de betão branco estrutural aparente; utilização de um revestimento de proteção que seja impermeável à água e permeável ao vapor de água.

Outro método tido em consideração foi a remoção do betão carbonatado e execução de nova betonagem nas zonas retiradas; optou-se por não avançar com este método, por ser económica e tecnicamente inviável, pois em alguns casos, as peças estavam excessivamente carbonatadas e, ao retirar o betão carbonatado, fragilizava e danificava o betão que permanecesse na peça.

As guardas semicirculares da cobertura, devido ao seu baixo recobrimento e elevada degradação, foram substituídas integralmente por peças novas prefabricadas.

A argamassa de reparação apenas foi aplicada nas zonas em que existam indícios de corrosão ativa, fissurações, delaminação do betão e zonas com recobrimento baixo.

Os trabalhos preparatórios efetuados antes da aplicação do método de reparação do betão foram os seguintes (seguindo a norma EN 1504):

- Limpeza das superfícies de betão por meio de jato de água ou de areia;
- Detecção de armaduras com recobrimento inferior a 20 mm;
- Corte e deslocamento das armaduras nos casos em que as mesmas se encontram à superfície da peça de betão;
- Marcação das superfícies de betão a reparar, onde exista visível anomalia e/ou recobrimento inferior a 20 mm;
- Remoção de betão com uma profundidade mínima de 20mm nas zonas a reparar, recorrendo ao corte com discos abrasivos, expondo as armaduras até 5 mm por trás delas;
- Preparação das superfícies para melhor aderência à argamassa de reparação, através de martelo de agulhas ou jato de areia;
- Tratamento das armaduras por eliminação da oxidação e reposição de secções de armaduras, se necessário;
- Abertura das juntas de dilatação e de betonagem existentes nos edifícios, assim como a reparação dos bordos danificados e aplicação de mástique flexível ‘*Sikaflex Pro 2 hp*’ (ficha técnica no anexo III);
- Aplicação da argamassa de reparação para a reconstituição das peças de betão, com ‘*Reabilita RBB 50*’ (ficha técnica no anexo III);
- Aplicação de revestimento de proteção sobre as superfícies de betão armado, com ‘*SecilTek AD05*’ (ficha técnica no anexo III).

De realçar que antes da aplicação nas fachadas dos edifícios, foram utilizados painéis protótipos para testar as reparações, de modo a verificar se que a argamassa e o revestimento de proteção cumpriam as exigências pedidas tanto ao nível das reparações, como ao nível estético.

Ao nível estético, as fachadas norte, devido à ausência de sol, temperaturas baixas e precipitação mostravam todas as reparações executadas na altura. Para essas fachadas utilizou-se ‘*Sikagard 670 W Elastocolor*’ e o primário ‘*Sikagard 552 W Aquaprimer*’ (fichas técnicas no Anexo III); esta solução fazia com que as reparações e defeitos de coloração do betão não fossem perceptíveis e só foi adotada nas fachadas norte devido ao custo ser mais elevado do que o produto ‘*SecilTek*’.

Nas restantes fachadas foi utilizada a resina da ‘*SecilTek AD05*’, destinada à uniformização da coloração do betão branco, cobrindo as manchas das intervenções mas mantendo o aspeto natural das peças de fachada. Este produto foi aplicado entre 3 a 4 demãos;

o método de reparação do revestimento de proteção, encaixa-se na NP EN 1504, no MR 1.3 e MR 2.3.



Figura 57 – Aplicação do revestimento de proteção nas fachadas, 2004

A escolha da argamassa '*Reabilita RBB 50*' vai de encontro à norma EN 1504-3 e corresponde a reparações em peças não estruturais, como é o caso. Primeiramente foram os protótipos a ser intervencionados por este produto e apresentariam um aspeto final muito semelhante às fachadas, na altura da conclusão da construção dos edifícios.

A aplicação daquela argamassa aceita camadas de espessura igual ou inferior a 20mm e no caso de aplicação de várias camadas, estas só podem ser aplicadas após o endurecimento da anterior. O método de reparação por argamassa encaixa-se na NP EN 1504, no MR 3.1, MR 7.2.



Figura 58 – Aplicação de argamassa de reparação, 2004

Como foi dito no início da descrição deste caso prático, o objetivo principal do autor é verificar o estado de conservação das intervenções executadas em 2006.

Foi feita uma visita ao local, com o intuito de identificar algumas anomalias por inspeção visual, com o auxílio fotográfico.

Para uma maior facilidade de perceção apresenta-se por módulo, os defeitos encontrados 7 anos após as reparações descritas acima e os defeitos em 2004, antes das reparações.

➤ Módulo A:

- Ano de 2004:

No registo de anomalias foram identificadas fissuras, delaminação do betão e armaduras expostas, nas zonas referentes às figuras 59 e 60 do alçado sul e nascente do módulo ‘A’ (Anexo III - projeto de alçados).

- Ano de 2013:

Após a inspeção visual dos vários alçados do módulo ‘A’, os defeitos mais visíveis foram: zona de pintura a descascar na fachada e vestígios de intervenção recente para eliminar graffiti no alçado sul, conforme figura 59; fissura que propicia a entrada de ar ou água e possível propagação de carbonatação no alçado nascente, conforme figura 60.

Nos restantes alçados também havia casos pontuais de pintura a descascar, mas sem fissurações significativas.



Figura 59 – Descasque da pintura na fachada sul do módulo ‘A’ , 2013



Figura 60 – Fissura na fachada nascente do módulo ‘A’ , 2013

➤ Módulo B:

- Ano de 2004:

No registo de anomalias foram identificadas fissuras, delaminação do betão e armaduras expostas; na zona da figura 61, no alçado nascente realça-se uma fissura com 0,4 mm (Anexo III - projeto de alçados).

- Ano de 2013:

Após a inspeção visual dos vários alçados do módulo ‘B’, os defeitos mais visíveis foram: zona de pintura a descascar na fachada e uma fissura reincidente no alçado nascente, conforme figura 61.

Nos restantes alçados também havia casos pontuais de pintura a descascar, mas sem vestígios de fissuração ou anomalias de maior.



Figura 61 – Descasque da pintura e fissura reincidente na fachada nascente do módulo ‘B’ , 2013

➤ Módulo C:

- Ano de 2004:

No registo de anomalias foram identificados os mesmos defeitos dos outros módulos. Realça-se a junta de dilatação situada no alçado norte (figura 62); a delaminação do betão e as armaduras expostas, situadas no painel referente ao alçado sul (figura 63); a delaminação do betão e os varões longitudinais expostos, situados no alçado interior da escada (figura 64) (Anexo III – projeto de alçados).

- Ano de 2013:

Após a inspeção visual dos vários alçados do módulo ‘C’ constituído por 3 corpos, os defeitos mais visíveis foram: o envelhecimento da junta de dilatação intervencionada e a presença de fissuras com propensão a entrada de água no alçado norte, conforme a figura 62; o descasque de pintura e presença de eflorescências no alçado sul, conforme a figura 63; os pontos de corrosão e descasque de pintura no alçado interior da escada, conforme a figura 64.

Nos restantes alçados havia casos pontuais de pintura a descascar, microfissuras e sujidade nas fachadas.

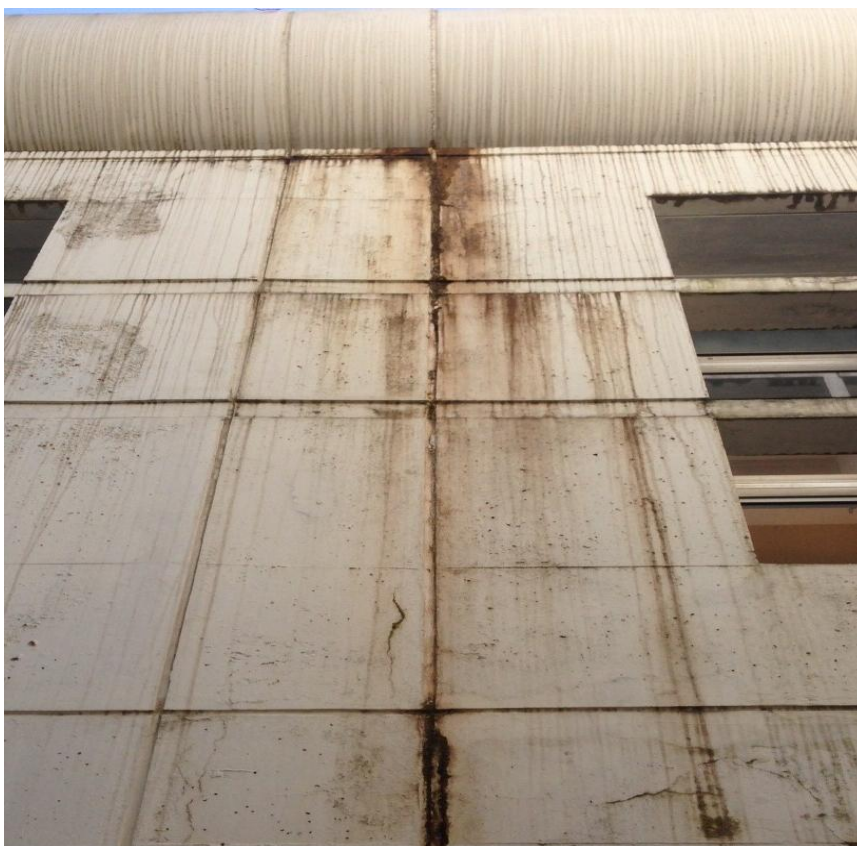


Figura 62 – Presença de fissuras e envelhecimento da junta de dilatação do módulo ‘C’ , 2013



Figura 63 – Presença de eflorescências e descasque de pintura no módulo ‘C’ , 2013



Figura 64 – Pontos de corrosão e descasque de pintura nas escadas interiores do módulo ‘C’ , 2013

Este edifício tem acesso à cobertura ao nível do jardim envolvente, permitindo a observação do aspeto atual das peças semicirculares (figura 65).



Figura 65 – Peças semicirculares na cobertura do módulo ‘C’ , 2013

➤ Módulo D:

- Ano de 2004:

No registo de anomalias foram identificados os mesmos defeitos dos outros módulos. Realçam-se as zonas de delaminação do betão e armaduras expostas a serem intervencionadas, referentes ao alçado norte (figura 66); a fissura de 1 mm no alçado nascente, situada na figura 67 (Anexo III – projeto de alçados).

- Ano de 2013:

Após a inspeção visual dos vários alçados do módulo ‘D’, os defeitos mais visíveis foram: algumas fissuras e perceptível noção da localização das intervenções de 2004, por desgaste da camada de acabamento, no alçado norte e conforme a figura 66; uma fissura com risco de delaminação do betão, reincidente na mesma localização da fissura do ano de 2004, no alçado nascente e conforme a figura 67.

Nos restantes alçados também havia casos pontuais de pintura a descascar, mas sem fissurações significativas.



Figura 66 – Fissuração superficial e perceção das áreas de intervenção em 2004 ‘D’ , 2013



Figura 67 – Fissura reincidente e risco de delaminação do betão no módulo ‘D’ , 2013

➤ Módulo E:

- Ano de 2004:

No registo de anomalias foram identificados os mesmos defeitos dos outros módulos. Realçam-se as zonas de delaminação do betão e armaduras expostas a serem intervencionadas nos membros das janelas, referentes ao alçado sul (figura 68 e 69); fissuras horizontais nos elementos verticais da altura do edifício, no alçado nascente situado na figura 70 (Anexo III – projeto de alçados).

- Ano de 2013:

Após a inspeção visual dos vários alçados do módulo ‘E’, os defeitos mais visíveis foram: fissuras nos elementos das janelas que tiveram uma grande intervenção, no alçado norte e conforme as figuras 68 e 69; algumas fissuras horizontais e manchas presentes nos elementos verticais da fachada nascente e conforme a figura 70.

Nos restantes alçados também havia casos pontuais de pintura a descascar e de microfissuras.



Figura 68 e 69 – Fissuras nos elementos verticais das janelas no módulo ‘E’ , 2013



Figura 70 – Fissuras horizontais e manchas nos elementos verticais de fachada no módulo ‘E’ , 2013

Esta comparação pretende realçar algumas das zonas críticas na altura da intervenção e que se afigura continuarem presentes ao fim de 7 anos; o autor regista os defeitos mais importantes e visíveis em cada um dos edifícios.

Anomalias como fissuras, descasques de tinta e eflorescências, sujidade e microfissuras, são comuns por algumas zonas dos cinco edifícios, que já contam com 7 anos desde a última e única intervenção. No estado em que se encontra o edifício nos dias de hoje, pode-se dizer que será a altura ideal para outra intervenção, talvez mais ligeira mas que pode evitar a abertura de mais fissuras, de pontos de ferrugem já existentes, de propagação de carbonatação no interior das peças e do início da corrosão das armaduras.

Em suma e na opinião do autor, transportando a data de intervenção para os dias de hoje e tomando a NP EN 1504 como referência, podia-se ter optado por outros métodos de intervenção.

Com a noção de que os custos poderiam ser mais elevados, o MR 7.3 – realcalinização eletroquímica do betão carbonatado e o MR 7.1 – aumento do recobrimento com argamassa ou betão, seriam dois bons métodos.

A projeção de microbetão com polímeros epóxi é uma boa opção (exceto para peças totalmente carbonatadas) para o combate à carbonatação, tendo em atenção a limpeza prévia da superfície e a criação de rugosidade, para a aderência da projeção à superfície já existente.

A realcalinização eletroquímica do betão seria a técnica mais adequada a este tipo de obra, devido aos cuidados estéticos do acabamento final, pois não necessita da aplicação de pinturas ou argamassas; este método acrescenta uma proteção à armadura e aumenta a alcalinidade do meio sem se remover qualquer betão, exceto nas zonas em que a armadura se encontre visível e completamente corroída.

Ao nível da metodologia adotada tudo se encontra conforme a NP EN 1504, desde os ensaios efetuados aos trabalhos preparatórios a adotar e a executar antes da aplicação do método escolhido.

7. Conclusão

Em termos gerais, foram cumpridos os objetivos propostos, que se apresentaram de uma forma sintetizada e organizada, desde a origem das causas da deterioração em estruturas de betão armado até à metodologia apropriada para a sua reparação ou prevenção, sempre com o propósito de vir a servir como ferramenta útil de consulta na área da reabilitação.

Como reflexão histórica, considerava-se que as estruturas de betão armado tinham uma durabilidade infinita, o que se veio a verificar não ser verdade. Já há algumas dezenas de anos, surgiram problemas, particularmente agravados em estruturas de betão armado aparente, sem revestimento do betão.

Identificam-se em Lisboa diversos edifícios de referência, onde surgiram problemas de degradação corrosão das armaduras e consequente delaminação do betão. Este fenómeno não é exclusivo (nesta dissertação referem-se alguns exemplos como a Fundação Calouste Gulbenkian, a Escola José Gomes Ferreira e a Igreja dos Olivais Sul) a nível nacional; referem-se, neste trabalho, casos idênticos em São Paulo, Brasil, e em Ronchamp, França.

Os estudos que têm vindo a ser feitos por diversos autores, têm procurado relacionar as degradações encontradas com as suas causas. Verifica-se, em edifícios, que são relevantes as degradações associadas à carbonatação do betão, a qual permite uma acidificação que facilita / induz a corrosão das armaduras.

Esta dissertação focou essencialmente situações deste género, mas na realidade existem outras causas para a degradação do betão armado, que aqui foram apenas referidas, como a corrosão das armaduras pela ação dos cloretos.

Após isto, retira-se deste estudo que entre os diversos métodos de prevenção, reparação ou tratamento de betão carbonatado, se têm de aplicar os que evitem a penetração de gases e evitem o contato direto da armadura com a água ou humidade. Considerando a duração das intervenções e os custos inerentes, os métodos mais objetivos e de custos não elevados envolvem a aplicação de microbetão com polímeros epóxi, a injeção de fissuras, a impregnação simples por resinas sintéticas e a utilização de membranas asfálticas ou betuminosas. Qualquer uma destas intervenções terá sucesso no combate à carbonatação, pois como já foi referido, esta resulta da difusão do dióxido de carbono atmosférico CO_2 na presença de água ou humidade.

Assumiu-se como particularmente interessante a compilação dos trabalhos de reparação feitos no âmbito da normalização europeia, tendo sido desenvolvida a NP EN 1504.

O autor analisou neste trabalho, os métodos e técnicas de prevenção e reparação analisados na NP EN 1504, norma que coloca em ordem as técnicas que o mercado vai apresentando. Um bom tema de estudo será o de continuar a aprofundar estes métodos, pois estes assuntos nunca estarão encerrados e estão sempre associados às composições dos betões, ao seu transporte e à sua colocação, como também aos processos de proteção.

Bibliografia

1. Allen, R.T.L., Edwards, S.C., Shaw, J.D.N. (1993). The Repair of Concrete Structures. London: Chapman & Hall.
2. Antunes, E. (2010). Efeitos estruturais das reações químicas expansivas no betão. Dissertação apresentada à Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico para a obtenção de grau de mestre em Eng^o Civil, Lisboa. Acedido em 20 de Dezembro de 2013 em <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/2589870406747/Tese%20final.pdf>
3. Appleton, J. & Costa, A. (2013). Reparação de Estruturas de Betão Armado In www.civil.ist.utl.pt. Acedido a 24 de Setembro de 2013 em <http://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/RREst/modulo5.pdf>.
4. Appleton, J. (2005a). Construções em Betão – Nota histórica sobre a sua evolução In www.civil.ist.utl.pt. Acedido a 13 de Maio de 2013 em <http://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/GDBAPE/ConstrucoesEmBetao.pdf>.
5. Appleton, J. (2005b). Inspeção e Reabilitação de Pontes In www.civil.ist.utl.pt. Acedido a 12 de Dezembro de 2013 em <http://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/GDBAPE/ForumIST.pdf>
6. Betão Liz (2013). Regras Básicas da utilização do betão em obra In www.cimpor-portugal.pt. Acedido a 10 de Maio de 2013 em http://www.cimpor-portugal.pt/cache/binImagens/Regras_Basicas_Betao_versao_BL-818.pdf.
7. Broomfield, J.P. (2003). A reparação do betão armado In www.buildingconservation.com. Acedido a 24 de Setembro de 2013 em <http://5cidade.files.wordpress.com/2008/04/a-reparacao-do-betao-armado.pdf>.
8. Catarino, R.A. (2010). Reabilitação de Superfícies de Betão Aparente. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para a obtenção do grau de mestre em Eng.^o Civil, Porto. Acedido a 23 de Setembro de 2013 em <http://repositorio-aberto.up.pt/>.
9. Costa, A. (2012a). Durabilidade das Estruturas de Betão In www.civil.ist.utl.pt. Acedido a 14 de Novembro de 2013 em <http://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/RREst/modulo3.pdf>.

10. Costa, A. (2012b). Execução de Estruturas de Betão In www.civil.ist.utl.pt. Acedido a 10 de Julho de 2013 em <http://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/bape2/documents/ExecucaoEstruturasBetao.pdf>.
11. Costa, A. (2011). Reabilitação e Reforço de Estruturas – Corrosão do Aço e Deterioração do Betão In www.civil.ist.utl.pt. Acedido a 10 de Novembro de 2013 em http://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/RREst/Aulas_Apresentacoes/Aula_07.1_Tipos_de_terioracao.pdf.
12. Coutinho, A.S. (1988). Fabrico e Propriedades do Betão Vol. II. Lisboa: LNEC.
13. Coutinho, A.S. (1988). Fabrico e Propriedades do Betão Vol. I. Lisboa: LNEC.
14. Decreto-lei nº 28/2007 de 12 de Fevereiro. Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado (REBAP).
15. Decreto-lei nº 404/71 de 23 de Setembro. Regulamento de Betões de Ligantes Hidráulicos (RBLH).
16. European Standard EN 14038 – 1 (2014). Electrochemical realkalization and chloride extraction treatments for reinforced concrete.
17. Eurocódigo II (2010). Projeto de estruturas de betão – Parte 1.1: Regras Gerais e Regras para Edifícios. NP EN-1992-1-1.
18. Ferreira, C.A. (1989). Betão: A idade da descoberta. Lisboa: P.P.
19. Ferreira, C.A. (1972). Betão Aparente em Portugal. Lisboa: Edição A.T.I.C.
20. Ferreira, R.H. (2006). Arquitetura e Universidade – ISCTE. Lisboa: ISCTE e Librus Publicações Técnicas.
21. Ferreira, R.M. (2000). Avaliação dos Ensaio de Durabilidade do Betão. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia da Universidade do Minho para a obtenção do grau de mestre em Eng.º Civil, Guimarães. Acedido a 15 de Julho de 2013 em https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/40/1/Rui_Miguel_Ferreira_DECivil.pdf.
22. Grinover, M.M. (2010). Lina Bo Bardi e Glauber Rocha: diálogo para uma filosofia da “práxis”. Dissertação apresentada à Faculdade Arquitetura de São Paulo para obtenção do grau de mestre. Acedido a 10 Novembro de 2013 em http://www.docomobahia.org/linabobardi_50/15.pdf.

23. Júnior, C.C. (2011). Técnicas de recuperação de estruturas de concreto armado sob efeito da corrosão das armaduras In www.issuu.com. Acedido a 10 de Outubro de 2013 em http://issuu.com/ibape_mg/docs/tecnicas_de_recuperacao_de_estruturas_de_concreto.
24. Lapa, J.S. (2008). Patologia, Recuperação e Reparo das Estruturas de Concreto Armado. Monografia apresentada à Universidade Federal das Minas Gerais para obtenção do título de especialização em Construção Civil, Belo Horizonte. Acedido a 10 de Outubro de 2013 em <http://www.cecc.eng.ufmg.br/trabalhos/pg1/Patologia,%20Recupera%E7%E3o%20e%20Reparo%20das%20Estruturas%20de%20Concreto.pdf>.
25. Lisbon Eco-Friendly Action Forum (2010). Fundação Calouste Gulbenkian – Edifícios da Sede e Museu e Centro de Arte Moderna In www.gulbenkian.pt. Acedido a 2 de Agosto de 2013 em http://www.gulbenkian.pt/media/files/FTP_files/pdfs/ambiente2010/PGA-16Abril2010-PensarVerde_FCG.pdf.
26. LNEG (2000). Inspeção e Reparação de Estruturas de Betão Armado com Corrosão. Coordenação: Salta, M., Gonçalves, A., Catarino, J.M. & Ribeiro M.S. Seminário realizado no Laboratório Nacional Engenharia Civil; Lisboa, Portugal, Julho, 2000. Lisboa.
27. LNEG (2012). Corrosão e Proteção de Materiais In www.lneg.pt. Acedido a 25 de Setembro de 2013 em <http://www.lneg.pt/download/5887/>.
28. Moreira, M.F. (1991). Superfícies de Betão Aparente. Tese apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para a obtenção do grau de Mestre em Eng.º Civil, Porto.
29. Museu de Arte de São Paulo. Acedido a 25 Novembro de 2013 em http://pt.wikipedia.org/wiki/Museu_de_arte_de_s%C3%A3o_paulo#O_edif.C3.ADcio.
30. Nepomuceno, M.C. (1999). Estudo da Composição dos Betões. Aula teórico-prática elaborada e apresentada à Universidade da Beira Interior para provas de aptidão Pedagógica e Capacidade Científica, Covilhã. Acedido a 28 de Agosto de 2013 em www.cmade.ubi.pt/pdf/teses_mestrado/Miguel.Nepomuceno.papcc.aula.pdf.
31. Norma Portuguesa EN 206-1 – 4ª Edição Maio de 2008 (2007). A Especificação do Betão. Associação Portuguesa das Empresas de Betão Pronto (APEB).

32. Norma Portuguesa EN 1504-1 (2005). Produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão - Definições. Instituto Português da Qualidade (IPQ).
33. Norma Portuguesa EN 1504-2 (2005). Produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão – Sistemas de proteção superficial do betão. Instituto Português da Qualidade (IPQ).
34. Norma Portuguesa EN 1504-3 (2006). Produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão – Reparação estrutural e não-estrutural. Instituto Português da Qualidade (IPQ).
35. Norma Portuguesa EN 1504-4 (2005). Produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão – Colagem estrutural. Instituto Português da Qualidade (IPQ).
36. Norma Portuguesa EN 1504-5 (2005). Produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão – Injeção do Betão. Instituto Português da Qualidade (IPQ).
37. Norma Portuguesa EN 1504-6 (2008). Produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão – Ancoragem de Armaduras de Aço. Instituto Português da Qualidade (IPQ).
38. Norma Portuguesa EN 1504-7 (2008). Produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão – Proteção contra a Corrosão de Armaduras. Instituto Português da Qualidade (IPQ).
39. Norma Portuguesa EN 1504-9 (2009). Produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão – Princípios Gerais para a utilização de produtos e sistemas. Instituto Português da Qualidade (IPQ).
40. Norma Portuguesa EN 1504-10 (2008). Produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão – Aplicação de produtos e sistemas e controlo de qualidade da obra. Instituto Português da Qualidade (IPQ).
41. Ordem dos Engenheiros (2013, 25 de Outubro). Seminário sobre Técnicas não Tradicionais de Reabilitação Estrutural do Betão Armado, Lisboa, Portugal.
42. Oliveira, P.S. (2011). Novas técnicas eletroquímicas de recuperação de estruturas de concreto: Realcalinização e Dessalinização (Extração de Cloretos) In www.impercia.com.br. Acedido a 3 de Outubro de 2013 em <http://www.impercia.com.br/tecnologias/REPARO%20E%20PATOLOGIAS/ARTIGOS%20TECNICOS/REALCALINIZACAO%20E%20DESSALINIZACAO%20.pdf>.
43. Palma, I.C. (2010). A expressão do betão aparente na obra de *Le Corbusier*. Dissertação apresenta ao Instituto Superior Técnico para obtenção do título de mestre em Arquitetura. Acedido a 18 Novembro de 2013 em <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/2589870519475/dissertacao.pdf>.

44. Pattanaik, S.C. (2011) Causes, Evaluation and Repair of Cracks in Concrete Structures In www.drfixitinstitute.com. Acedido a 24 de Setembro de 2013 em <http://www.drfixitinstitute.com/download/Causes,Evaluation%20and%20Repair%20of%20cracks.pdf>.
45. Prémio Secil de Engenharia Civil (1999). Edifício Atrium Saldanha. Ordem dos Engenheiros, Lisboa.
46. Ribeiro, J.L. (2009). Contribuição para a avaliação da compatibilidade eletroquímica entre argamassas de reparo e concreto carbonatado. Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor, São Paulo. Acedido a 9 de Outubro de 2013 em www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/.../Tese_Jose_Luis_Serra_Ribeiro.pdf
47. Ribeiro, R.M. (2010). Concreto Aparente: Uma contribuição para a construção sustentável. Monografia apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais para obtenção do título de especialização, Belo Horizonte. Acedido a 5 de Julho de 2013 em <http://www.cecc.eng.ufmg.br/trabalhos/pg2/58.pdf>.
48. Rodrigues, M.P. (1998). Durabilidade de revestimentos por pintura para proteção do betão armado. Porto, FEUP.
49. Saraiva, J.G. (2007). Técnicas de Proteção e reparação de Estruturas de Betão Armado. Dissertação apresentada ao Instituto Superior Técnico para a obtenção do grau de mestre em Eng.º Civil, Lisboa. Acedido a 24 de Setembro de 2013 em <https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/147761/1/Dissertacao.pdf>.
50. Silva, E.A. (2006). Técnicas de recuperação e reforço de estruturas de concreto armado. Dissertação apresentada à Universidade Anhembi Morumbi para obtenção do título de Graduação do Curso de Engenharia Civil, São Paulo. Acedido a 24 de Setembro de 2013 em <http://engenharia.anhembi.br/tcc-06/civil-46.pdf>.
51. Silva, P. & Djanikian, J. (1993). Durabilidade das Estruturas de Concreto Aparente em Atmosfera Urbana. São Paulo: EPUSP. Acedido a 7 de Novembro de 2013 em http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT_00109.pdf.
52. Simas, M.S. (2007). Sistemas de proteção do betão face à carbonatação. Dissertação apresentada ao Instituto Superior Técnico para a obtenção do grau de mestre em Eng.º Civil, Lisboa.

53. Sousa, A.F. (2008). Reparação, reabilitação e reforço de estruturas de betão armado. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para a obtenção do grau de mestre em Eng.º Civil, Porto.
54. Souza, M. & Ripper, T. (1998). Patologia, recuperação e reforço de Estruturas de Concreto. São Paulo: PINI. Acedido a 10 de Outubro de 2013 em <http://docente.ifrn.edu.br/valtencirgomes/disciplinas/patologia-e-rec-de-estrutura/livro-de-patologia>.
55. Steinhaus, C.T. (2010). Nova sede da Igreja Evangélica. Dissertação apresentada à Universidade Fevale para a obtenção da graduação em Arquitetura, Novo Hamburgo.
56. Toscano, Maria da Conceição da Costa Almeida (2012). Dissertação de Mestrado Universidade Aberta.
57. Tostões, A. (2004). Construção moderna: As grandes mudanças do século XX In www.in3.dem.ist.utl.pt. Acedido a 2 de Julho de 2013 em http://in3.dem.ist.utl.pt/msc_04history/aula_5_b.pdf.
58. Viseu, C.S. (1993). História do Betão Armado em Portugal. Lisboa: Edição A.T.I.C

Anexo I – Ficha técnica referente ao caso prático da laje situada na Rua de S.Bento

Neste anexo apresenta-se a ficha técnica do produto utilizado no caso prático da laje, situada na Rua de S.Bento, para aderência e proteção de armaduras ‘*Sika Monotop 910 S*’, de acordo com a NP EN 1504.

Anexo II – Referente ao caso prático da Igreja Nossa Senhora de Fátima

Neste anexo apresenta-se:

- Mapa de quantidades referente ao caso prático da Igreja Nossa Senhora de Fátima;
- Peças desenhadas da intervenção;
- Relatório dos ensaios de cloretos;
- '*Mapegrout Tissotropico*' – argamassa de reabilitação de betão, da Mapei;
- '*Planitop 200*' – argamassa cimentícia mono componente, da Mapei;
- '*Mapenet 150*' – rede de fibra de vidro, da Mapei;
- '*Planitop 100*' – argamassa de acabamento;
- '*Malech*' – primário para tinta de base acrílica, da Mapei;
- '*Elastocolor*' pintura – tinta elástica de base acrílica, da Mapei.

Anexo III – Fichas técnicas referentes ao caso prático da Escola José Gomes Ferreira, em Benfica

Neste anexo apresenta-se:

- Projetos com alçados e identificação de anomalias dos vários módulos;
- ‘*Sikaflex Pro 2 hp*’ – mástique de poliuretano, da Sika;
- ‘*Reabilita RBB 50*’ – argamassa de reparação de betão branco, da Secil;
- ‘*SecilTEK AD 05*’ – resina acrílica de proteção, da Secil;
- ‘*Sikagard 670 W Elastocolor*’ - pintura de proteção e decorativa para betão, da Sika;
- ‘*Sikagard 552 W Aquaprimer*’ - primário aquoso promotor de aderência, para betão.