



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

Mestrado de Engenharia Civil
Especialidade em Construção

Dissertação

Ataques Químicos no Betão

Edwin dos Santos Teixeira

Orientador:

Dr. António Santos Silva

Co-Orientador:

Prof. Dr. António Bettencourt Ribeiro

9/10/2011

Mestrado de Engenharia Civil
Especialidade em Construção

Dissertação

Ataques Químicos no Betão

Edwin dos Santos Teixeira

Orientador:

Dr. António Santos Silva

Co-Orientador:

Prof. Dr. António Bettencourt Ribeiro

Resumo.

Ataques químicos no betão.

Os ataques químicos, causados por fatores intrínsecos e extrínsecos constituem algumas das principais formas de deterioração do betão. Nesta dissertação pretende-se analisar as consequências de determinadas reações químicas de origem interna e/ou externa, nomeadamente as ações das águas doce e do mar e por ácidos inorgânicos e orgânicos na degradação do betão. Analisar-se-ão também os ataques por sulfatos e por nitratos, por sais de magnésio e por agentes bioquímicos, abordando-se ainda a corrosão das armaduras e por fim as reações expansivas internas.

O presente trabalho surge com o intuito de fazer uma descrição dos principais tipos de ataques químicos, tenham estes origem no ambiente envolvente às estruturas ou decorram de ações antrópicas, de forma a induzir uma maior consciencialização para as suas causas e principalmente para os seus efeitos a curto e longo prazos nas estruturas de betão armado.

Abstract.**Chemical attack in concrete.**

Chemical attacks caused by intrinsic and extrinsic factors are some of the major forms of deterioration of concrete. This dissertation aims to analyse the consequences of certain chemical reactions of domestic and/or external origin, including the actions of the ocean and fresh water, as well as inorganic and organic acids in the degradation of concrete. This analysis will also focus the attacks by sulfates and nitrates, magnesium salts and biochemical agents, addressing the corrosion of the reinforcement concrete and finally the internal expansive reactions.

This paper aims to formulate a description of the main types of chemical attacks, whether their origin is in the surrounding structures or a result of anthropic actions, in order to induce a greater awareness for their causes and effects in the short and long term in reinforced concrete structures.

Agradecimentos.

Todos os trabalhos, sejam eles quais forem, não são obra de uma única pessoa, mas sim o resultado de uma combinação de esforços e incentivos de várias pessoas. Este trabalho não foi exceção, visto que ele foi o culminar da ajuda de vários intervenientes, aos quais deixo o meu sincero agradecimento.

Ao professor Dr. António BettencourtRibeiro que demonstrou pronta disponibilidade, em virtude da minha ida para Brasília, emme ajudar, desde a proposta do tema, a toda a orientação para eu entrar em contato com todos intervenientes que me ajudaram na elaboração deste trabalho, assim com a sua disponibilidade e ajuda demonstrada ao longo da dissertação.

Ao Dr. António Santos Silva a quem tive o privilégio de conhecer e ser orientado com uma sabedoria, rigor e conhecimentos ímpares. Expresso o meu sincero agradecimento pela constante disponibilidade, incentivos e apoios manifestados, assim como pelas críticas e sugestões que contribuíram para a elaboração deste trabalho.

A ambos, desejo expressar o meu sincero agradecimento.

Aos meus pais, que proporcionaram as condições que me permitiram chegar até este nível de formação, pelo apoio permanente e interesse com que encararam a Licenciatura e o Mestrado que agora concluo.

Aos meus irmãos pelo entusiasmo demonstrado por cada meta que era atingida nesta longa jornada.

À minha namorada Juliana, por toda a paciência demonstrada na fase final do mestrado e ao longo desta dissertação, e por todas as imagens e gráficos utilizados neste trabalho que foram por ela criados/adaptados. Sempre com uma palavra de incentivo e motivação na reta final do Mestrado, ela nunca me deixou desistir. Obrigado por me fazeres sorrir, mesmo nos períodos de maior cansaço.

A todos dedico o resultado deste trabalho.

Índice.

Resumo.	iv
Abstract.	v
Agradecimentos.	vi
Lista de quadros.	x
Lista de figuras.	xi
1 Introdução.	1
1.1 Enquadramento e motivação.	3
1.2 Objetivos do trabalho.	3
1.3 Estrutura do trabalho.	4
2 Durabilidade e vida útil das estruturas de betão.	5
2.1 Planeamento e projeto.	7
2.2 Cimento - constituição	8
2.2.1 Tipos de cimento	12
2.3 Utilização e manutenção das estruturas de betão.	17
2.4 Ação do meio ambiente nas estruturas de betão.	18
2.4.1 Classes de exposição do betão.	21
3 Tipos de ataques químicos ao betão.	24
3.1 Ataques pela água doce.	32
3.2 Ataque pela água do mar	41
3.3 Ataque por ácidos.	48
3.3.1 Ácidos inorgânicos (clorídrico, nítrico, sulfúrico, fosfórico e etc).	52
3.3.2 Ácidos orgânicos.	55
3.4 Ataque por sulfatos.	56
3.5 Ataque por nitratos.	62
3.6 Ataque por sais de magnésio.	65
3.7 Ataque bioquímico.	66
3.8 Corrosão das armaduras.	70
3.8.1 Carbonatação.	72
3.8.2 Ingresso de cloretos.	80
3.9 Reações expansivas internas.	86
3.9.1 Reações álcalis-agregado.	87
3.9.2 Reações sulfáticas internas.	100

4	Alguns exemplos de manifestações patológicas nas estruturas de betão e formas de prevenção/reparação.	107
4.1	Corrosão galvânica por meio da fixação de estrutura metálica para veiculação de propaganda em fachadas e empenas das edificações.	109
4.2	Degradação de estruturas por reações expansivas de origem interna caso de estudo: Viaduto Duarte Pacheco em Lisboa.	113
5	Considerações finais e conclusões.	120
6	Bibliografia.	123
7	Anexos.	138

Índice de quadros.

Quadro 1	Categorias de vida útil na NP EN 1990.	5
Quadro 2	Tipos de cimento Portland segundo a NP EN 197-1.	13
Quadro 3	Sem risco de corrosão ou ataque.	22
Quadro 4	Corrosão induzida por carbonatação.	22
Quadro 5	Corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar.	22
Quadro 6	Corrosão induzida por cloretos da água do mar.	23
Quadro 7	Ataque pelo gelo/degelo.	23
Quadro 8	Combinações de classes de exposição.	23
Quadro 9	Classificação dos tipos de ataque segundo Popovics.	25
Quadro 10	Água de amassadura: Características, exigências e documentos normativos do betão.	37
Quadro 11	Reações que acompanham a dissolução da portlandite.	40
Quadro 12	Reações que acompanham a dissolução da portlandite.	40
Quadro 13	Teor crítico de cloretos em função da classe de exposição do betão, especificação LNEC E465.	81
Quadro 14	Classes de reatividade dos agregados.	87

Índice de figuras.

Figura 1	Alvord Lake Bridge, primeira ponte de betãoarmado do mundo, construída em 1889.	1
Figura 2	Aplicação do pré-esforço em uma viga de betão armado e pré-esforçado.	2
Figura 3	Recobrimento insuficiente em uma laje de betão da Universidade de Brasília, Brasil.	6
Figura 4	Metodologia para a implementação de um modelo para a previsão da vida útil da componente de construção (adaptado).	7
Figura 5	Metodologia preventiva para assegurar a durabilidade das estruturas de betão (adaptado).	8
Figura 6	Clínquer para utilização no cimento.	9
Figura 7	Gipsita (matéria prima para fabricação do gesso).	10
Figura 8	Escória Siderúrgica.	10
Figura 9	Pozolana.	11
Figura 10	Pedra calcária.	12
Figura 11	Patologia relacionada com ataque químico no edifício da Universidade de Évora, Portugal.	17
Figura 12	Reparação das fendas existentes num pilar de um viaduto.	18
Figura 13	Fissuração tipo <i>map-cracking</i> no espelho d'água da Biblioteca Nacional de Brasília, Brasil.	19
Figura 14	Ação da variação térmica em Évora, Portugal (ciclo gelo/degelo), pode desencadear o surgimento de fendas no betão.	20
Figura 15	Percolação de água e ocorrência de depósitos e incrustações calcárias na UnB, Brasília, Brasil.	24
Figura 16	Ataques por lixiviação na base de um pilar de um viaduto que esteve em contacto com a água.	27
Figura 17	Expansão por ataques por sulfatos e por corrosão em zona próxima ao mar.	28
Figura 18	Reações superficiais deletérias, Museu Nacional de Brasília, Brasil.	29
Figura 19	Fissuração por reação álcalis-agregado.	29

Figura 20	Depassivação das armaduras por carbonatação, viaduto Flamboyant, Goiânia, Brasil.	30
Figura 21	Depassivação das armaduras por ingresso de iões cloreto, Doca do Bom Sucesso, Lisboa, Portugal.	31
Figura 22	Diminuição do diâmetro no duto (adaptado).	32
Figura 23	Efeitos da cavitação, Miranda, 1966.	33
Figura 24	Efeitos da cavitação, Miranda, 1974.	34
Figura 25	Percolação de água e grande ocorrência de depósitos e incrustações calcárias, UnB, Brasília, Brasil.	35
Figura 26	Tentativa fracassada de reparação da percolação de água, ainda se verifica a ocorrência de depósitos e incrustações calcárias, UnB, Brasília, Brasil.	36
Figura 27	Barragem Avon na Austrália.	37
Figura 28	Substituição da barragem DrumAfterbay nos EUA em 1966.	39
Figura 29	Manchas provocadas pela ação das águas da chuva, Universidade de Brasília, Brasil.	39
Figura 30	Patologia grave provocada pela ação da água do mar, onde todo o betão afetado pela ação da maré foi “eliminado”.	41
Figura 31	Patologia provocada pela ação da maré em uma estrutura de betão.	44
Figura 32	Representação esquemática da ação das marés nas estruturas de betão (adaptado).	45
Figura 33	Reparação de uma estrutura de betão no fundo do mar.	47
Figura 34	Utilização da Jaqueta G, produzido pela Rogertec [®] , que possui uma durabilidade média de 10 a 20 anos para a proteção contra a ação da água do mar no betão.	47
Figura 35	As estruturas de betão destinadas aos esgotos são as mais vulneráveis aos ataques por ácidos.	48
Figura 36	Reparação de um reservatório de tratamento de águas residuais sujeito a ataque ácido.	49
Figura 37	Ataque provocado por derramamento de ácido de baterias de automóveis, numa oficina.	51
Figura 38	Graves danos em uma rede de esgotos provocada por ataques ácidos no betão.	53

Figura 39	Tubos de betão para redes de esgotos plastificados internamente para proteção contra ataques químicos por ácidos orgânicos.	55
Figura 40	Ataque por sulfatos com conseqüente corrosão da armadura.	56
Figura 41	Danos na calçada de betão em contato direto com o solo, Palácio da Alvorada, Brasília, Brasil.	57
Figura 42	Pormenor dos danos na calçada de betão em contacto direto com o solo, Palácio da Alvorada, Brasília, Brasil.	60
Figura 43	Degradação de materiais de base cimentícia por ação do nitrato de amónio (adaptado).	62
Figura 44	Construção de uma torre-silo numa fábrica de Fertilizantes nos EUA (1996).	63
Figura 45	Resistência à flexão dum betão C40 imerso numa solução com 5% de NH_4NO_3 , sob diferentes tensões (adaptado).	64
Figura 46	Relação entre a força relativa e a profundidade de penetração para betões imersos em soluções de 10% de NH_4NO_3 (adaptado).	65
Figura 47	A utilização de sais de magnésio na agricultura podem afetar futuras construções em antigos solos agrícolas.	66
Figura 48	Central de águas residuais, onde os ataques bioquímicos são o principal agente patológico no betão.	67
Figura 49	Incrustações de plantas em calha de escoamento de águas pluviais em betão, Reitoria da UnB, Brasil.	68
Figura 50	Danos provocados por um vazamento de um tubo de esgoto num supermercado, Brasília, Brasil.	69
Figura 51	Distribuição relativa do CO_2 (aq), HCO_3^- , CO_3^{2-} em função do pH a 25°C (adaptado).	71
Figura 52	Representação esquemática do processo de carbonatação no betão (adaptado).	73
Figura 53	Profundidades de carbonatação medidas com fenolfetaína em vários provetes expostos a ambientes com 50% de HR, 5% de CO_2 (Profundidades de carbonatação em função da raiz quadrada do tempo) (adaptado).	74
Figura 54	Representação esquemática da corrosão da armadura causada pela carbonatação (adaptado).	75
Figura 55	Influência da resistência à compressão do betão sobre a profundidade de carbonatação (adaptado).	76

Figura 56	Danos causados pela carbonatação em uma estrutura de betão armado.	77
Figura 57	Extração de uma carote de um pilar de betão para a medição da profundidade de carbonatação.	77
Figura 58	Medição da frente de carbonatação com uma solução alcoólica de fenolftaleína.	78
Figura 59	Com o valor da profundidade da carbonatação e com auxílio de um martelo de impactos pode-se determinar a resistência do betão.	79
Figura 60	Comparação entre os perfis totais de cloretos previstos e medidos numa estrutura destinada ao estacionamento de viaturas com 20 anos de idade. O gráfico mais pequeno ilustra a variações climáticas na estrutura durante 1 ano (adaptado).	82
Figura 61	Corrosão nos cabos de pré-esforço de uma estrutura de betão pré-esforçado.	84
Figura 62	Proteção catódica das armaduras contra a corrosão por cloretos.	85
Figura 63	Influência do teor de álcalis do cimento na expansão de provetes de argamassa (adaptado).	86
Figura 64	Expansão devida à RAA em prismas de betão ($75 \times 75 \times 300 \text{ mm}^3$) imersos em água, contendo diferentes quantidades de sílica (SiO_2) sintética amorfa (adaptado).	87
Figura 65	Reparação da fissuração provocada por reações expansivas internas.	88
Figura 66	Imagem ao microscópio eletrónico de varrimento de um produto da RAA.	89
Figura 67	Diagrama esquemático do comportamento péssimo de uma argamassa com teor de álcalis de 6 kg/m^3 e razões água/cimento e agregado/cimento de 0,4 e 2,75, respectivamente (adaptado).	90
Figura 68	Efeito do tipo de adição na expansão devida à RAA de um agregado reativo riolítico. Notação: sílica de fumo (CSF); cinzas volantes (FA); e escória granulada de alto-forno (GBFS) (adaptado).	91
Figura 69	Observação ao microscópio petrográfico de lâminas delgadas de betão que mostram a micro fissuração por gel da RAA: (esquerda) imagens com polarizadores paralelos e (direita) cruzados.	91
Figura 70	Ilustração do modo de calcular o teor limite de álcalis para um dado tipo de agregado (adaptado).	92
Figura 71	Pormenor dos efeitos da reação álcalis-agregados no betão fissuras em rede e destacamento, Biblioteca Nacional de Brasília, Brasil.	93
Figura 72	Fatores que promovem a RAA (adaptado).	94

Figura 73	Efeito da humidade relativa na expansão do betão devida à RAS (esquerda), e efeito da humidade e da água na expansão de argamassas afetadas por RAS. A transição de ambiente ocorreu aos 41 dias (direita) (adaptado).	95
Figura 74	Efeito do aumento da temperatura na cinética da expansão devida à RAS em argamassas de cimento Portland tipo III (adaptado).	95
Figura 75	Representação esquemática do ataque dos álcalis à sílica bem cristalizada (a) e mal cristalizada (b) (adaptado).	96
Figura 76	Influência de diferentes quantidades de cinzas volantes, escórias e sílica de fumo (microsílica) em substituição de cimento na expansão de argamassas (ASTM 1260) (adaptado).	97
Figura 77	Relação entre o teor de álcalis ativos do cimento e a dosagem de cimento no betão, e o resultante potencial para a RAS (adaptado).	98
Figura 78	Observação ao microscópio petrográfico de lâminas delgadas de betão, evidenciando o processo de desdolomitização através da ocorrência de orlas de alteração e de fissuras num agregado dolomítico.	99
Figura 79	Fenda no betão provocada pela RAS.	99
Figura 80	As diferentes fontes de sulfatos para o betão (adaptado).	101
Figura 81	Representação da formação da etringite relacionada com a SER (adaptado).	101
Figura 82	Fatores que promovem as Reações Sulfáticas Internas (adaptado).	102
Figura 83	Mecanismos reacionais da DEF (adaptado).	102
Figura 84	Efeito da supressão da expansão devida à DEF com a variação do teor de substituição (% em massa), de cimento Portland por adições minerais tipo II. Composições com cinzas volantes (1º gráfico) e metacaulino (2º gráfico) (adaptado).	103
Figura 85	Vista ao microscópio eletrónico de varrimento de etringite expansiva decorrente de reações sulfáticas internas em amostras de betão.	104
Figura 86	Aspeto ao Microscópio Eletrónico de Varrimento (MEV) de uma pasta de cimento Portland, com silicatos hidratados (CSH) e etringite primária (E).	105
Figura 87	Aspeto ao MEV de uma pasta de cimento Portland com poros preenchidos (setas a vermelho) por etringite secundária.	106
Figura 88	Ilustração das tendências para a formação de etringite após o arrefecimento do betão, as linhas de tendência representam a	107

quantidade de estrigite formada após o arrefecimento, que aumenta no sentido da seta AB. O M representa o monossulfato e E a estrigite, M+EE significa que existe monossulfato e estrigite durante o aquecimento e que depois no arrefecimento aquele se transforma totalmente em estrigite (adaptado).

Figura 89	Mecanismo básico da corrosão galvânica (adaptado).	108
Figura 90	Propaganda instalada na fachada de um prédio em Salvador, Bahia, Brasil.	109
Figura 91	Foto de patologias provocadas pela instalação de um painel publicitário.	111
Figura 92	Esquema de ancoragem estrutural (adaptado).	112
Figura 93	Viaduto Duarte Pacheco após a sua conclusão.	114
Figura 94	Alçado Longitudinal do Viaduto Duarte Pacheco em Lisboa.	114
Figura 95	Obras de manutenção no Viaduto Duarte Pacheco em Lisboa.	115
Figura 96	Patologias registradas no V. D. P. típica das reações expansivas da origem interna e a corrosão de armaduras.	116
Figura 97	Medição da humidade no interior do betão.	117

1 – Introdução.

De entre a enorme variedade de combinações e de materiais atualmente empregues na construção civil, o betão¹ é o material que tem sido mais largamente utilizado, dada a enormidade de gamas de utilização possíveis que este material permite.

O moderno betão surgiu com a patente do cimento Portland² por John Aspdin em 1824. Nesses primeiros anos, no entanto, mesmo nas nações mais desenvolvidas da época, o betão tinha uma aplicação pouco significativa. Foi somente no fim do século que Louis Vicat e René Ferét trataram de tornar o betão num material mais conhecido e mais confiável, resultando no crescente interesse do seu uso generalizado em estruturas. De referir, que nessa época o material estrutural de construção civil mais utilizado era o aço.

Com o propósito teórico e experimental de aumentar a confiança no betão, surgiu a disponibilização de uma forma industrializada de cimento Portland. Posteriormente, François Hennebique (1841-1921), um construtor francês autodidata, desenvolveu e obteve a patente para o projeto e construção com base em um novo sistema construtivo por ele denominado de “béton armé” (betão armado³). Esse método construtivo foi o grande impulsionador da utilização do betão em larga escala no mundo.



Figura 1: Alvord Lake Bridge, primeira ponte de betão armado do mundo, construída em 1889_[01].

É impossível dissociar o desenvolvimento do mundo moderno, nomeadamente das grandes cidades e das obras de arte (como pontes, estradas e barragens), essenciais para o desenvolvimento tecnológico da humanidade, com o surgimento do betão, dadas as

¹ O betão ^(português europeu) ou concreto ^(português brasileiro) é um material da construção civil composto por uma mistura de cimento Portland, areia, pedra e água, além de outros materiais eventuais, os aditivos e as adições.

² Cimento Portland, foi o nome dado pelo químico britânico Joseph Aspdin ao pó de cimento, em homenagem à ilha britânica de Portland devido à cor de suas rochas.

³ Betão armado ^(português europeu) ou concreto armado ^(português brasileiro) é um material da construção civil que se tornou num dos mais importantes elementos da arquitetura do século XX. É usado nas estruturas dos edifícios. Diferencia-se do betão devido ao fato de receber uma armadura metálica responsável por resistir aos esforços de tração, enquanto que, o concreto em si resiste à compressão.

suascaracterísticas particulares que o tornam no material de maior utilização na história da construção.

De entre as suas diversas propriedades, destacam-se o seu baixo custo comparativamente a outros materiais ou opções construtivas (ex: estruturas metálicas), a facilidade de execução de elementos de infinitas formas e dimensões e a facilidade de obtenção e disponibilidade dos seus materiais constituintes.

Dadas as excelentes prestações e desempenhos prestados pelas estruturas de betão, o meio técnico admitiu que ele fosse um material que não precisava de grandes cuidados de manutenção. Assim, o betão foi sendo largamente utilizado numa grande variedade de condições e ambientes, por vezes em condições extremamente desfavoráveis.



Figura 2: Aplicação do pré-esforço em uma viga de betão armado e pré-esforçado [02].

As estruturas de betão (nomeadamente as de betão armado ou de betão armado e pré-esforçado) que apresentavam elevadas resistências mecânicas eram submetidas a elevadas tensões de serviço. Isso deu origem a estruturas mais esbeltas e económicas, o que fez com que ficassem com uma maior sensibilidade a ataques de agentes agressivos. A importância do estudo das patologias nas construções, assim como as suas causas, tornou-se num fator de extrema importância a considerar durante a fase de projeto e execução das construções de betão.

Uma vez que a deterioração do betão dá-se basicamente por efeitos físicos, mecânicos, químicos ou por efeitos eletroquímicos, o estudo das causas de ataques químicos no betão foi ganhando importância, sendo nos dias de hoje vital para o estudo das manifestações patológicas mais frequentes e incidentes e no respectivo conhecimento da evolução das mesmas. Assim, garante-se um menor custo na reparação das anomalias detectadas e também na melhoria do controle da qualidade nos pontos críticos e específicos das construções em função do meio ou dos agentes aos quais estarão expostas.

Daqui resulta que os fatores básicos que controlam ou definem a durabilidade nas construções de betão são a qualidade do material em si e as condições do meio ambiente

envolvente às construções. Esses também são os fatores mais influentes na questão da durabilidade do betão. No entanto, há que se referir que as medidas tomadas nas diversas etapas dos processos construtivos têm grande impacto na obtenção de estruturas duráveis e resistentes aos agentes ambientais. Esta tarefa não é fácil, uma vez que a quantidade de agentes envolvidos e as relações entre esses agentes e o betão são grandes. No entanto, o estudo das causas de degradação e a avaliação da vida útil das construções são fatores imprescindíveis por um lado para o estabelecimento de medidas preventivas eficazes, e por outro, para que se reduzam os custos envolvidos na recuperação ou substituição das construções afetadas.

1.1 - Enquadramento e motivação.

As estruturas de betão, nomeadamente as de betão armado, revolucionaram a indústria da construção. À medida que o conhecimento sobre as propriedades do aço e do betão foram aumentando, foi possível construir seções cada vez mais esbeltas, aumentando assim as tensões exercidas sobre o betão e o aço.

Tais avanços permitiram a minimização dos custos e a possibilidade de um infinito leque de formas e feitios que se podem obter com estruturas de betão armado. No entanto, tais avanços revelaram um inimigo às estruturas de betão: A degradação provocada pelos ataques químicos no betão, nomeadamente em ambiente agressivo, principalmente no meio marinho. Isso fez com que a durabilidade das estruturas de betão ficasse fortemente comprometida, reduzindo a vida útil das estruturas e aumentando muito os custos de manutenção e reparação não previstos na fase de planeamento e projeto.

Assim, a fase de planeamento e de projeto é de grande importância para assegurar a durabilidade das estruturas de betão. Portanto, é necessário o prévio conhecimento do meio envolvente à estrutura e das especificações de durabilidade requeridas para a mesma.

Daí surge a motivação e a escolha deste tema para o desenvolvimento deste trabalho. Cada vez mais estruturas de betão apresentam patologias provocadas por ataques químicos, pelo que se revela muito importante o conhecimento dos tipos de ataques mais frequentes que podem ocorrer nos diversos meios a que as estruturas de betão estão sujeitas. Assim, será cada vez mais importante que nas fases de estudo e de projeto, se tenha uma particular atenção à questão da durabilidade do betão.

1.2 – Objetivos do trabalho.

A partir de diversos casos reportados em todo o mundo, tornou-se evidente que o betão pode sofrer danos de contaminantes químicos internos, externos ou por uma combinação de ambos. Também é importante mencionar que alguns processos químicos e físicos de deterioração podem atuar ao mesmo tempo e podem-se reforçar mutuamente. As análises dos

vários casos estudados evidenciam resultados que apresentam problemas de considerável complexidade. Este trabalho tem como objetivo principal uma análise genérica dos principais tipos de ataques químicos às estruturas de betão, assim como a identificação das principais formas de degradação das mesmas.

Assim, neste trabalho vão-se referir também as principais formas de reparação, recuperação ou de reforço de estruturas de betão afetadas por ataques químicos, através da análise de dois casos de estudo analisados por investigadores portugueses e brasileiros, onde são exploradas as manifestações patológicas encontradas nas estruturas em análise, assim como as suas causas e as medidas a tomar para a prevenção e para a minimização desses ataques.

Desta forma, pretende-se garantir uma maior compreensão das formas e processos de deterioração verificados, nas suas causas, e nas medidas preventivas e corretivas que podem ser tomadas, além de um conhecimento genérico sobre os principais tipos de ataques químicos existentes, de forma a se consciencializarem os engenheiros para este problema cada vez mais presente nas estruturas atuais.

1.3 – Estrutura do trabalho.

Este trabalho foi realizado essencialmente com base em pesquisa bibliográfica (livros, artigos e notícias⁴) e através da ajuda de Investigadores e Engenheiros ligados à área. Assim, pretende-se garantir um entendimento global sobre os principais tipos e formas de ataques químicos nas estruturas de betão.

Sobre os tipos de ataques químicos abordados e considerando a vastidão dos tipos de ataques verificados em ambientes específicos, tal como a quantidade de informação existente sobre os mesmos, não permite efetuar uma análise minuciosa de todos eles. Por isso, neste trabalho, serão abordados apenas os ataques químicos mais frequentes e importantes que afetam as estruturas de betão. Desta forma, com os dados obtidos durante a pesquisa para a realização deste trabalho, puderam-se inferir muitas das considerações aqui realizadas, tanto nas causas das manifestações patológicas como nos meios de recuperação e de minimização dos ataques químicos nas estruturas de betão. Assim, o trabalho foi organizado e estruturado em 6 capítulos conforme a seguir se descreve:

- No primeiro capítulo, é feita uma introdução ao trabalho, onde são descritos o enquadramento e motivação, os objetivos do mesmo e a estrutura do trabalho.

- No segundo capítulo, serão abordados e explicados os conceitos de durabilidade e vida útil das estruturas. Também serão abordados os tipos de cimentos existentes, assim como os seus constituintes, os fatores que têm uma influência significativa, propriedades da durabilidade, (como a execução das estruturas de betão), as propriedades do material, as características do meio ambiente (com ênfase nos ambientes salinos e classes de exposição do betão). Também serão abordadas as formas de se tentar modelar a vida útil das estruturas.

⁴ Todos os livros, artigos e notícias consultados e referenciados neste trabalho se encontram discriminados no capítulo 6.

- No terceiro capítulo, será abordado o tema principal deste trabalho, os ataques químicos nas estruturas de betão. Será dado destaque aos tipos de ataques que mais afetam as estruturas de betão. Os mesmos serão explicados e abordados de forma a dar uma visão geral do seu mecanismo e das suas consequências para as estruturas.

- No quarto capítulo, em sequência direta com os temas abordados no capítulo anterior, serão abordados e analisados dois trabalhos de investigação sobre as manifestações patológicas nas estruturas de betão analisadas, e as formas de prevenção e reparação das mesmas em função dos tipos de ataques a que as mesmas foram sujeitas.

- No quinto capítulo, serão feitas as considerações finais e conclusões que se podem tirar após a realização deste trabalho, sobre os tipos de ataques químicos que mais afetam as estruturas de betão, sobre as medidas que podem e devem ser tomadas para minimizar o seu impacto e sobre a forma de assegurar a sua durabilidade durante a sua vida útil.

- No sexto e último capítulo, serão feitas referências a toda bibliografia consultada. Uma vez que este trabalho foi desenvolvido com base numa compilação de várias fontes tais como artigos, revistas, livros, páginas e documentos obtidos na internet, todos eles serão mencionados. Também serão aqui descritas as fontes de todas as citações utilizadas ao longo desta dissertação.

2 - Durabilidade e vida útil das estruturas de betão.

“A durabilidade é uma qualidade da estrutura e a vida útil é a quantificação desta qualidade.” Esta frase apresenta a temática do artigo intitulado “Vida útil das estruturas de concreto” de autoria dos professores Silva Santos e André Sagave⁵. Os termos durabilidade e vida útil estão tão próximos que, por vezes, são utilizados de maneira equivocada, uma vez que a primeira se refere à qualidade da estrutura e a segunda à quantificação desta qualidade.

Vida útil		Exemplos
Categoria	Anos	
1	10	Estruturas temporárias.
2	10 a 25	Partes estruturais substituíveis.
3	15 a 30	Estruturas para a agricultura e semelhantes.
4	50	Edifícios e outras estruturas comuns.
5	100	Edifícios e monumentos, pontes e outras estruturas de engenharia.

Quadro 1: Categorias de vida útil na NP EN 1990.

A atual utilização do betão armado, como referido anteriormente, tornou-se vulgar no mundo moderno devido aos avanços nos conhecimentos das propriedades e dos métodos de

⁵ Silva Santos e André Matte Savage; Concreto e Durabilidade – Vida útil das estruturas de concreto, Universidade do Vale do Itajaí, Brasil,(2003) artigo disponível unicamente no site: http://www.altoqi.com.br/index2.asp?browser=IE#duvidas_usuais/Textos_explicativos/Vida_util_das_estruturas_de_concreto.htm

cálculo, o que tem implicado uma diminuição da seção resistente e das espessuras de recobrimento.

Também o aumento da quantidade de armadura, a dificuldade da acomodação de betão fresco e a utilização de sobre dosagens de água levam à criação de uma estrutura de betão armado mais porosa⁶. O recobrimento menor e a aplicação do pré-esforço, que diminui ainda mais as seções e implica um aumento nas tensões no aço, levam a que as estruturas de betão armado sejam mais sensíveis aos fenómenos de degradação.



Figura 3: Recobrimento insuficiente em uma laje de betão da Universidade de Brasília, Brasil.

No entanto, uma estrutura de betão armado pode ser considerada durável se durante a sua vida útil ela conservar os requisitos de projeto em termos de segurança, de funcionalidade e de estética, sem acréscimos de custos devido à manutenção ou reparações não previstos (01). Uma vez que o desempenho das estruturas de betão armado ao longo da sua vida útil não pode ser melhorado unicamente pelo aumento da qualidade dos materiais utilizados, uma especial atenção deve ser atribuída a esse fator na fase de projeto da estrutura e da arquitetura (02).

Assim, deve-se atuar logo nos projetos de estruturas e de arquitetura, assim como no nível de processos de execução da obra e nos procedimentos relativos à inspeção e manutenção, inclusive à manutenção preventiva (02). Todos estes aspetos devem ser considerados à priori, já que a falta de controle da qualidade durante a construção e a inexistência ou a inadequação de planos de inspeção e manutenção da durabilidade durante a vida de serviço das estruturas contribuem para a diminuição da vida útil. Tudo isso torna o betão, nomeadamente o betão armado, um material muito vulnerável e pouco estável, fazendo com que a sua durabilidade seja reduzida. (03).

⁶ A porosidade tem influência na impermeabilidade e, conseqüentemente, na durabilidade das estruturas de betão. A proporção entre a água e o cimento utilizados na mistura é chamada por vezes de relação ou fator água/cimento. As proporções entre areia e brita na mistura tem influência na facilidade de se adaptar às formas e na resistência.

2.1 – Planeamento e projeto.

As fases de planeamento e de projeto são de grande importância para assegurar a durabilidade das estruturas de betão, tal como descrito anteriormente. Porém, atualmente a durabilidade das estruturas é, em grande parte, baseada em requisitos prescritivos. Exemplo disso são as exigências mínimas e máximas de recobrimento, a razão água/cimento, a mínima dosagem e o tipo de cimento. Antigamente ao aplicar estes requisitos, o projetista assumia que uma determinada estrutura atingiria uma vida de serviço longa, mas não especificada, ou seja, não quantificada. Esta situação hoje em dia é, em muitos casos, inaceitável ⁽⁰⁴⁾.



Figura 4: Metodologia para a implementação de um modelo para a previsão da vida útil da componente de construção (adaptado)

[03]

As exigências de um formato de projeto que incorporasse a durabilidade e vida de serviço das estruturas nasceram do crescente interesse expresso pelos donos de obra em colocar exigências para a vida útil de serviço da estrutura. Atualmente, já se considera que a durabilidade é uma parte essencial da qualidade e desempenho das estruturas e que a qualidade e custo total incluem não só o custo de construção, mas também o de manutenção e reparação ⁽⁰⁴⁾.

O controle da durabilidade das estruturas de betão armado será um dos principais desafios para o engenheiro do futuro. O passado ensinou aos engenheiros de hoje que o procedimento tradicional de projeto, construção e uso de estruturas de betão armado, não tem resultado no desempenho esperado. Os processos de deterioração, em particular a corrosão das armaduras, as reações álcalis-agregado e os ataques de sulfatos têm causado grandes danos às estruturas de betão ⁽⁰⁴⁾.

Desta forma, com a devida e correta compilação da informação necessária, o engenheiro pode iniciar a análise da durabilidade recorrendo aos modelos criados para os vários mecanismos de degradação, de forma a obter a avaliação do desempenho. Assim, com base nesses resultados (tendo em conta também o estado limite considerado), o desempenho é classificado como sendo ou não aceitável. Em caso de não ser aceitável, será preciso intervir no projeto de forma a melhorar o desempenho, intervenção essa que pode ser feita no nível dos materiais, do projeto estrutural, do ambiente (através da atenuação da sua agressividade) e na qualidade da execução ⁽⁰⁴⁾.

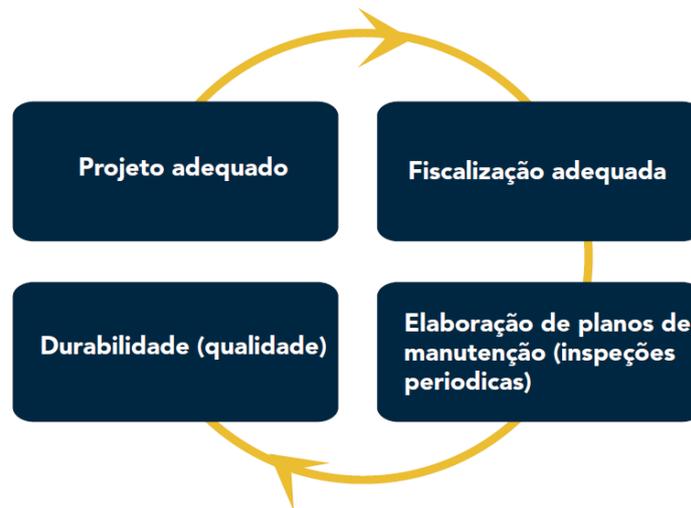


Figura 5: Metodologia preventiva para assegurar a durabilidade das estruturas de betão (adaptado)₍₀₃₎.

Os resultados das análises fornecem alguma garantia que a vida útil será alcançada (desde que haja o acompanhamento adequado que permita ainda avaliar a evolução do estado da estrutura ao longo do tempo). As inspeções e ensaios serão parte integral do projeto de durabilidade. Segundo o Prof. Rui Miguel Ferreira, “... esta abordagem não implica que seja dada menos atenção a fatores relacionados com o projeto estrutural ou processos construtivos como a cura, execução, detalhes apropriados, etc. De fato, esta abordagem apenas poder ser usada se for implementada a segurança e qualidade para assegurar que as consequências dos fatores ligados ao projeto e aos processos de construção sejam minimizadas. Da mesma forma que o projeto estrutural, o projeto de durabilidade deve ser desenvolvido com base em análises probabilísticas que considerem o meio envolvente e o desempenho estrutural...” ⁽⁰⁴⁾.

2.2 – Cimento - constituição

O Cimento Portland é composto por clínquer⁷ e por adições de outros componentes que vão conferir diferentes propriedades mecânicas e químicas. As adições podem, ou não, ser utilizadas em função da sua disponibilidade. Assim sendo, os constituintes principais do cimento Portland são ⁽⁰⁵⁾:

⁷ O clínquer é um material sintetizado e peletizado, resultado da calcinação (1450 °C), da mistura do calcário (75 a 80%), da argila (20 a 25%), e de outros componentes químicos como o silício, o alumínio e o ferro.

- Clínquer;
- Gesso;
- Subprodutos hidráulicos e pozolânicos;
- Filleres.

• Clínquer:

O clínquer é o principal constituinte dos cimentos Portland, sendo formado por silicato tri cálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), silicato dicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), aluminato de cálcio ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) e aluminoferrato tetracálcico ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$). Estes compostos fazem com que o cimento possua uma acentuada característica de ligante hidráulico e são os responsáveis pela resistência mecânica do material após a sua hidratação ⁽⁰⁵⁾.



Figura 6: Clínquer para utilização no cimento ⁽⁰⁴⁾.

A produção do clínquer é o núcleo do processo de fabricação do cimento Portland, sendo a etapa mais complexa e crítica em termos de qualidade e custo do produto final. As matérias-primas são abundantemente encontradas em jazidas em diversas partes do planeta, sendo de 80% a 95% de calcário, 5% a 20% de argila e pequenas quantidades de minério de ferro, sendo que os principais compostos químicos do clínquer são ⁽⁰⁵⁾:

- | | |
|---|--------|
| • Silicato tricálcico $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ | 45-75% |
| • Silicato dicálcico $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ | 7-35% |
| • Aluminato tricálcico $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ | 0-13% |
| • Aluminoferrato tetracálcico $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ | 0-18% |

• Gesso:

O gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), é adicionado em quantidades geralmente inferiores a 5% da massa de clínquer. O gesso terá a função de regular o tempo para início do endurecimento do cimento (tempo de presa). Sem esta adição, o tempo de presa do cimento seria de poucos

minutos, tornando o seu uso inviável. Devido a este fator o gesso é uma adição obrigatória, estando sempre presente na constituição dos cimentos Portland ⁽⁰⁵⁾.



Figura 7: Gipsita (matéria prima para fabricação do gesso) ^[05].

- **Escória siderúrgica:**

A escória siderúrgica é um subproduto dos altos-fornos (equipamentos que produzem, por exemplo, aço a partir de minério de ferro). Na escória, entre as diversas impurezas, concentram-se silicatos que adicionados ao cimento possuem características hidráulicas ⁽⁰⁵⁾.



Figura 8: Escória Siderúrgica ^[06].

Sendo um subproduto, este material tem um menor custo em relação ao clínquer e é utilizado também por aumentar a durabilidade do cimento, principalmente em ambientes com

presença de sulfatos. Porém, a partir de certo grau de substituição de clínquer a resistência mecânica do cimento com escória diminui, sendo portando a dosagem desse constituinte no cimento um processo muito bem controlado ⁽⁰⁵⁾.

• Pozolanas:

As pozolanas são materiais que reagem espontaneamente com cálcio em fase aquosa, por conterem um elevado teor de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) reativas.

Esta característica levou ao seu uso generalizado em complemento ao clínquer, com a característica de tornar os betões mais impermeáveis à água, o que é extremamente útil para diversas aplicações do cimento, como por exemplo, na construção de barragens ⁽⁰⁵⁾.



Figura 9: Exemplo de um dos vários tipos de pozolana utilizados na composição do cimento ⁽⁰⁷⁾.

As pozolanas foram materiais originalmente obtidos de detritos vulcânicos (tendo sido utilizadas pelos Romanos para a fabricação do seu betão), sendo as mais célebres oriundas da região de Pozzuoli, na Itália. Existem atualmente outros materiais, de origens diferentes, que são considerados pozolânicos dado possuírem composições químicas e físicas semelhantes às das pozolanas naturais. De entre esses materiais, incluem-se as argilas ativadas termicamente e alguns subprodutos industriais, como as cinzas volantes provenientes da queima de carvão mineral ⁽⁰⁵⁾.

O processo de ativação de argilas é amplamente utilizado pela própria indústria de cimentos, sendo geralmente realizado em fornos rotativos semelhantes aos utilizados na fabricação de clínquer ou mesmo em antigos fornos de clínquer adaptados, trabalhando a temperaturas mais baixas (até $900\text{ }^\circ\text{C}$) e em menos tempo para a sua ativação ⁽⁰⁵⁾.

Tal como a escória siderúrgica, as pozolanas têm frequentemente um menor custo quando comparadas ao clínquer e só podem substituí-lo até um determinado grau, tal como explicado anteriormente para as escórias siderúrgicas e gesso ⁽⁰⁵⁾.

• Calcário:

O calcário é composto basicamente por carbonato de cálcio (CaCO_3), sendo este composto encontrado abundantemente na natureza. É utilizado como elemento de preenchimento, dadas as suas capacidades de penetrar nos interstícios das demais partículas e de agir como um lubrificante, tornando assim o cimento mais plástico e não prejudicando na atuação os restantes constituintes ⁽⁰⁵⁾.



Figura 10: Pedra calcária ^[08].

O calcário é também utilizado para reduzir o custo final do cimento, visto que é um material de diluição, utilizado para reduzir o teor dos outros componentes de maior custo, desde que não ultrapassando os limites de composição ou reduzindo a resistência mecânica a níveis inferiores ao que está estabelecido nas normas ou especificações ⁽⁰⁵⁾.

2.2.1 – Tipos de cimento

O cimento (palavra derivada do latim *cæmentu*) é um material cerâmico que, em contato com a água, produz uma reação exotérmica de cristalização (com libertação de calor), de produtos hidratados, ganhando assim resistência mecânica ⁽⁰⁶⁾. Ele é o principal material de construção usado como aglomerante⁸. Com o passar do tempo, as propriedades físico-químicas do cimento Portland têm evoluído constantemente, nomeadamente com a utilização de aditivos⁹ que melhoraram significativamente as características do cimento. Atualmente, o cimento Portland é um material normalizado, sendo que a norma Portuguesa para o cimento é a NP EN 197.

Na NP EN 197-1 estão definidos 27 tipos de cimento Portland ⁽⁰⁷⁾:

⁸Um aglomerante ou ligante é um material que tem como finalidade a aglutinação de outros materiais (agregados), influenciando dessa forma a resistência do material resultante.

⁹Os aditivos podem ser aceleradores, retardadores, fibras, corantes e etc.

Tipos principais	Notação dos 27 produtos (tipos de cimento correntes)		Composição (percentagem em massa) (a)										Constituintes adicionais minoritários	
			Constituintes principais											
			Clique K	Escória de alto-forno S	Sílica de fumo (b) D	Pozolana		Cinza volante		Xisto cozido T	Calcário			
						Natural P	Natural calcinada Q	Siliciosa V	Calcária W		L	LL		
CEM I	Cimento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cimento Portland de escória	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-75	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cimento Portland de sílica de fumo	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cimento Portland de pozolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cimento Portland de cinza volante	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Cimento Portland de xisto cozido	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Cimento Portland de calcário	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Cimento Portland composto (c)	CEM II/A-M	80-94	6-20										0-5
		CEM II/B-M	65-79	21-35										0-5
	CEM III	Cimento de alto-forno	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CEM III/B			20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM III/C			5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Cimento pozzolânico (c)	CEM IV/A	65-89	-	11-35					-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	36-55					-	-	-	0-5	
CEM V	Cimento composto (c)	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30			-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-30	-	31-50			-	-	-	-	0-5	

Quadro 2: Tipos de cimento Portland segundo a NP EN 197-1.

- (a) - Os valores do quadro referem-se à soma dos constituintes principais com os minoritários.

- (b) - A incorporação de sílica de fumo é limitada a 10%.
- (c) - Nos cimentos Portland compostos CEM II/A-M e CEM II/B-M, nos cimentos pozolânicos CEM IV/A e CEM IV/B e nos cimentos compostos CEM V/A e CEM V/B os constituintes principais além do clínquer, devem ser declarados na designação do cimento.

Para além da norma NP EN 197, em Portugal existem ainda outras normas referentes ao cimento:

- NP 2064 - Cimentos. Definições, comportamento, especificações e critérios de conformidade;
- NP 2065 - Cimentos. Condições de fornecimento e receção;
- NP EN 196 - Métodos de ensaio dos cimentos.

Dado o grande número de tipos diferentes de cimento, considerou-se necessário para a elaboração da norma NP EN 197-1 separar os “cimentos correntes” dos cimentos especiais, isto é, aqueles com propriedades adicionais ou especiais. Dessa forma, o objetivo da NP EN 197-1 é o de especificar a composição, requisitos e critérios de conformidade para os cimentos correntes. Isto inclui todos os cimentos correntes que são designados pelos respetivos organismos nacionais de normalização dentro do CEN¹⁰ como tradicionais e bem experimentados ⁽⁰⁷⁾.

Para ter em conta os diferentes cimentos considerados anteriormente, foram introduzidos novos tipos de cimento, baseados na composição, e uma classificação baseada na resistência. O endurecimento destes cimentos depende principalmente da hidratação dos silicatos de cálcio do clínquer ⁽⁰⁷⁾. Os silicatos de cálcio são os principais constituintes do clínquer do cimento Portland, sendo que as matérias-primas para a sua fabricação devem possuir cálcio e sílica em proporções adequadas de dosagem⁽⁰⁶⁾.

Nos tipos principais de cimento utilizados em Portugal (CEM I, II, III, IV e V), o clínquer é o principal constituinte do cimento Portland. A produção do clínquer é o núcleo do processo de fabricação de cimento, sendo a etapa mais complexa e crítica em termos de qualidade e custo ⁽⁰⁶⁾.

O CEM I é o tipo de cimento Portland de uso mais genérico, sendo por isso usado em todos os tipos de construções. Entra tanto na composição do material estrutural mais frequente, o betão armado, como na formulação de argamassas hidráulicas de base cimentícia para os mais diversos fins. A única adição existente no CEM I é o gesso (< 3,5 %) ⁽⁰⁵⁾. O gesso (CaSO₄.2 H₂O) é adicionado em quantidades geralmente inferiores a 3% da massa de clínquer, ele terá a função de aumentar o tempo de presa do cimento (tempo para início do endurecimento). Sem esta adição, o tempo de presa seria de poucos minutos, inviabilizando o seu uso. Devido a isto, o gesso é uma adição obrigatória, presente desde os primeiros tipos de cimento Portland ⁽⁰⁶⁾.

O CEM II é um cimento misto do tipo II (composto), constituído pela mistura de clínquer Portland e aditivos minerais, como o filer de calcário ou materiais pozolânicos. Este tipo de cimento permite obter classes de resistência média à compressão compatíveis com as

¹⁰ Comité Europeu de Normalização.

habituais necessidades construtivas obtendo vantagens a nível de trabalhabilidade, calor de hidratação e económicas.

O cimento CEM II é o que possui a maior variedade de produtos, visto a quantidade de itens existentes nas diversas variedades disponíveis. Devido às amplas aplicações que o cimento CEM II pode abranger, os outros itens que também são utilizados no cimento do tipo CEM II são as escórias, de aparência semelhante à areia grossa (este é um subproduto de alto-forno, equipamentos que produzem, por exemplo, aço a partir de minério de ferro). Entre diversas impurezas como outros metais, se concentram na escória silicatos, que apesar de rejeitados no processo de metalização, proporcionam características de ligante hidráulico. Sendo um subproduto, este material tem menor custo em relação ao clínquer e é utilizado também por elevar a durabilidade do cimento, principalmente em ambientes com presença de sulfatos. Porém, a partir de certo grau de substituição de clínquer a resistência mecânica passa a diminuir (06).

Outro item utilizado nos cimentos tipo CEM II são as pozolanas que reagem espontaneamente com hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) em fase aquosa, por conterem elevado teor de sílica ativa (SiO_2). Esta característica levou ao uso de pozolanas como ligante hidráulico complementar ao clínquer, com a característica de tornar os betões mais impermeáveis o que é útil na construção, por exemplo, de barragens. As pozolanas são originalmente materiais de origem vulcânica, encontradas na região de Pozzuoli, Itália. Atualmente, materiais com origens diferentes, mas com composições semelhantes também são considerados pozolânicos, tais como as pozolanas ativadas artificialmente e alguns subprodutos industriais como as escórias de alto-forno ou as cinzas volantes provenientes da queima de carvão mineral (06).

Da mesma forma que as pozolanas, e tal como mencionado anteriormente neste trabalho, o processo de ativação das argilas (que é amplamente praticado pelas indústrias cimenteiras), é um passo fundamental para a sua utilização na composição dos cimentos Portland, visto que terão composição semelhante às argilas. Assim como a escória siderúrgica, as pozolanas frequentemente têm menor custo comparadas ao clínquer e só podem substituí-lo até um determinado grau (06).

Por fim, outro constituinte utilizado no cimento CEM II é o filer calcário, basicamente carbonato de cálcio (CaCO_3). É usado como elemento de preenchimento, capaz de penetrar nos interstícios das demais partículas e agir como lubrificante, tornando o cimento mais plástico e não prejudicando a atuação dos demais elementos. O calcário é também um material de diluição do cimento, utilizado para reduzir o teor de outros componentes de maior custo, desde que não ultrapassando os limites de composição ou reduzindo a resistência mecânica a níveis inferiores ao que estabelece a norma ou especificação (06).

O CEM III é um tipo de cimento que foi desenvolvido pelo setor cimenteiro como uma das medidas para a diminuição do consumo energético. O constituinte principal neste tipo de cimento são as escórias granuladas de alto-forno.

O cimento tipo CEM III apresenta maior impermeabilidade e durabilidade, além de baixo calor de hidratação, assim como alta resistência à expansão devido à reação álcali-agregado, além de ser resistente a sulfatos. É um cimento que pode ter aplicação geral em

argamassas de assentamento, revestimento, argamassa armada, de betão simples, armado, e pré-esforçado, projetado e outras. Mas é particularmente vantajoso em obras que impliquem a utilização de grandes quantidades de betão, tais como barragens, peças de grandes dimensões, fundações de máquinas, pilares, obras em ambientes agressivos, tubos e canaletas para condução de líquidos agressivos, esgotos e efluentes industriais, betões com agregados reativos, pilares de pontes ou obras submersas, pavimentação de estradas e pistas de aeroportos.

O CEM IV é um cimento Portland pozolânico que contém a adição de materiais pozolânicos num teor que varia entre 11% a 55% em massa. Este alto teor de pozolana confere a este tipo de cimento uma alta impermeabilidade e conseqüentemente uma maior durabilidade. O betão confeccionado com o cimento CEM IV apresenta uma resistência mecânica à compressão superior ao betão de cimento Portland comum a longo prazo.

Ele é especialmente indicado para obras expostas à ação de água corrente e ambientes agressivos ⁽⁰⁵⁾, com exigências específicas de durabilidade. É também o cimento mais adequado para a realização de estruturas e peças de betão em grande massa. É especialmente indicado e utilizado em:

- Fundações diretas e indiretas, túneis, depósitos e outros elementos em ambiente agressivo (águas ricas em sais prejudiciais);
- Obras em ambiente marítimo;
- Pavimentos industriais e superfícies sujeitas a ataque químico (óleos, águas ácidas);
- Betões para pavimentos rodoviários;
- Obras de betão em grande massa (barragens, maciços, etc.).

O CEM V destina-se a aplicações que necessitem de moderadas resistências à compressão nas primeiras idades e que estejam expostas a ataques químicos provenientes do meio ambiente. O cimento CEM V possui escórias de alto-forno em sua composição, o que lhe confere características ecológicas, ao reciclar esse material. Este cimento pode ser utilizado na produção de argamassas, artefatos de cimento, blocos de cimento, betão armado e pré-esforçado, pisos industriais e lajes⁽⁰⁷⁾.

No entanto é de se salientar que os cimentos possuem diferentes propriedades e desempenhos. Os ensaios de desempenho, utilizados na atualidade (tempo de presa, resistência e expansibilidade), foram incluídos na EN 197-1, além disso, está a ser desenvolvido pelo CEN/TC 51¹¹ um trabalho para definir os ensaios adicionais que sejam necessários para especificar outras características de desempenho do cimento ⁽⁰⁷⁾.

Até que esses ensaios de desempenho estejam disponíveis, é necessário que a escolha do cimento, especialmente o tipo e ou classe de resistência, em relação aos requisitos de durabilidade que dependem da classe de exposição e do tipo de construção onde é utilizado, obedeça às normas apropriadas e ou aos regulamentos para o betão ou argamassa, válidos no local de aplicação ⁽⁰⁷⁾.

¹¹ Entidade do Comité Europeu de Normalização.

2.3 - Utilização e manutenção das estruturas de betão.

A utilização e respetiva manutenção das estruturas de betão estão relacionadas com as manifestações patológicas que se venham a apresentar durante a sua utilização.

O surgimento de patologias em estruturas de betão tem origem em falhas que ocorrem durante as fases de realização de uma construção: concepção, projeto, execução e, posteriormente, durante a sua utilização. É durante a fase de utilização que se podem agravar as patologias existentes ou surgir novas patologias na estrutura.

Ross (1982), Andrade (1996), Helene (2001), entre outros, têm-se preocupado com o levantamento das patologias em estruturas de betão, com o principal objetivo de encontrar as causas responsáveis pela sua ocorrência. Mas as causas podem ser tão diversificadas que as conclusões que se obtém nem sempre são concordantes, especialmente porque as pesquisas são efetuadas com base em realidades diferentes. Para isso concorrem diferentes técnicas de concepção e construção, além de distintos ambientes de exposição a que as estruturas estão expostas. Além disso, os resultados das avaliações ainda podem ser influenciados pelos critérios adotados pelo observador.



Figura 11: Patologia relacionada com ataque químico no edifício da Universidade de Évora, Portugal.

A simples utilização de uma estrutura pode levar ao surgimento de patologias, seja pelos esforços a que ela está sujeita, seja pela agressão química a que fica exposta. Em muitas outras situações, o betão degrada-se naturalmente ao longo do tempo ou devido a falhas de execução.

Como elemento estrutural de grande importância para a segurança, o betão deve ser devidamente recuperado. Atualmente, não existem planos de inspeção ou manutenção para a maioria dos edifícios construídos em Portugal. Este fato origina o agravamento das patologias existentes, ao longo dos anos, muitas vezes só detectadas em fase já muito avançada. Isso provoca o aumento progressivo, se não exponencial, da degradação do estado de serviço dos edifícios e, muitas vezes, do estado de resistência estrutural dos mesmos.



Figura 12: Reparação das fendas existentes num pilar de um viaduto [09].

Uma inspeção periódica apresenta a grande vantagem de permitir a intervenção em tempo útil. A realização de obras de conservação na data certa permite evitar a necessidade de obras profundas de recuperação, reduzindo consideravelmente os custos ao longo da vida das estruturas de betão.

No entanto, se o ponto de comprometimento da estrutura for atingido, é necessário proceder à recuperação estrutural. Para isso, existem diversas técnicas e para sua execução é necessário escolher a melhor alternativa. Isso só poderá ser feito após o levantamento das causas da degradação e do estudo da exequibilidade de cada técnica de reparação. Assim, o primeiro passo para a recuperação estrutural é o diagnóstico das possíveis causas de degradação. As manifestações mais comuns são fissuras e fendas, corrosão das armaduras, manchas na superfície, desagregações, deformação excessiva, etc.

O segundo passo refere-se ao estudo da melhor técnica a aplicar para a recuperação da patologia, sendo o terceiro e último passo, a recuperação da patologia, com base na melhor técnica escolhida no passo anterior.

2.4 - Ação do meio ambiente nas estruturas de betão.

A ação do meio ambiente é a grande influenciadora da durabilidade das estruturas de betão. Os locais de implantação das estruturas, assim como os agentes que incidem sobre elas, irão determinar os fatores e os tipos de deterioração do betão. É por esse motivo que o conhecimento das condições climáticas (assim como as suas variações) e ambientais são importantes para determinar a escolha correta no projeto da estrutura a ser executada e dos materiais a serem utilizados na execução dos trabalhos.

Tal como já foi mencionado anteriormente, a vida útil de uma estrutura de betão depende da maneira como essa é utilizada, e também das condições ambientais ao qual a estrutura de betão ficará exposta. São inúmeros os fatores que influenciam diretamente na degradação da estrutura, tais como:

- A temperatura;
- A humidade relativa;
- O vento;
- A poluição;
- A agressividade da água (doce e salgada).



Figura 13: Fissuração tipo *map-cracking* no espelho d'água da Biblioteca Nacional de Brasília, Brasil.

Raramente existe um único fator ou agente isolado que determinará o nível de degradação da estrutura. Na generalidade dos casos, é a combinação de vários fatores que aumenta o nível de degradação das estruturas. Fatores como a temperatura, a humidade e o próprio vento, influenciam tanto o betão fresco como o endurecido, devido aos fenómenos de retração, o que provocará um aumento nas tensões, causando o surgimento de fissuras. Este fenómeno facilita a penetração de oxigénio e de humidade, permitindo a corrosão das armaduras.

As fissuras e os poros são uma das formas pela qual a água e a humidade podem entrar nas estruturas, provocando assim a degradação do betão (nomeadamente por corrosão das armaduras). A absorção ou ganho de água para o meio ocorre quando existe incidência de chuva direta (onde a intensidade, velocidade e direção do vento também terão um papel preponderante), ou então uma elevada humidade do ar. Como o betão é um material poroso, este absorverá a água, que acabará ficando armazenada no interior da sua estrutura. Essa humidade existente no interior dos poros irá interferir na velocidade de ataque dos vários mecanismos de degradação.

Um fator que ajuda na penetração da água no interior do betão ocorre devido ao fato de se tratar de um material muito susceptível à variação térmica, isto é, não ser capaz de absorver

as deformações provocadas por essas variações. As grandes amplitudes térmicas desencadeiam contração e retração, gerando dessa forma esforços de tração no betão causando fissuração na estrutura.



Figura 14: Ação da variação térmica em Évora, Portugal (ciclo gelo/degelo), pode desencadear o surgimento de fendas no betão^[10].

Nos ambientes urbanos, onde a maioria das estruturas de betão estão localizadas, os compostos que são lançados na atmosfera pelas indústrias e pelos veículos automotores, como por exemplo, o dióxido de enxofre, reagem com o vapor de água produzindo ácido sulfúrico, que é diluído pela água da chuva ou pela humidade do ar, e que, em contato com o betão, desencadeiam a sua degradação. Aliado às reações das substâncias químicas com a água, está à reação direta desses agentes com as estruturas, pois na atmosfera existem várias substâncias agressivas e que devem ser levadas em consideração como fator de degradação das estruturas de betão.

Nos ambientes urbanos, o principal agente a considerar é o dióxido de carbono (CO_2), que desencadeia o processo de carbonatação do betão e, conseqüentemente, a corrosão das armaduras. A reação provocada pelo CO_2 com os compostos hidratados do cimento, principalmente o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), dá origem ao carbonato de cálcio (CaCO_3) e água. Essas reações baixam o valor do pH do betão, alterando assim a sua estabilidade química, nomeadamente da película de passivação do aço, o que favorece o início da corrosão das armaduras.

Como se sabe, as estruturas de betão estão localizadas em diversos ambientes. Esses meios devem ser estudados para a definição do projeto das estruturas, prevendo as diversas ações de degradação, com a correta diferenciação dos diversos ambientes onde se encontram implantadas as estruturas de betão.

Os ambientes variam desde o urbano, o marítimo e outros com características específicas, tais como atmosferas contaminadas e industriais. No entanto, aquele que se tem revelado como mais prejudicial é o marítimo, fundamentalmente pela grande concentração de agentes agressivos e a alta velocidade de ataque proporcionada por esses agentes. Das

patologias existentes nas estruturas de betão em ambiente marítimo a que mais preocupa é a corrosão das armaduras, pois afeta diretamente a segurança.

Como se irá constatar ao longo deste trabalho, a água é o agente principal da maioria dos problemas que ocorrem nas estruturas de betão. Dado que o betão é um material muito poroso, ele fica muito sujeito aos processos químicos de degradação que atuam como fonte de transporte de iões agressivos. Esses processos tanto podem ocorrer com a água do mar, subterrânea, de rio, de lago, de neve, gelo, de chuva ou mesmo vapor.

2.4.1 - Classes de exposição do betão.

A durabilidade da estrutura deve ser garantida durante o período de vida útil do projeto, sem que haja a necessidade de ações de manutenção excepcionais, nem de reparação ou de reforço estrutural. Todas as estruturas devem ser concebidas tendo em conta ⁽⁰⁸⁾:

- O período de vida útil do projeto;
- O ambiente em que está integrada e os agentes agressivos com a capacidade de deteriorá-la.

Para isso, os meios à disposição do projetista para o controle da durabilidade da estrutura, tendo em conta as condicionantes ambientais, onde a estrutura será inserida, e o período de vida útil de projeto, são⁽⁰⁸⁾:

- A qualidade do betão a utilizar;
- A espessura do recobrimento das armaduras;
- As medidas especiais de proteção da superfície do betão e das armaduras.

Portanto, a escolha do tipo de cimento a utilizar numa estrutura de betão é essencial para a garantia da estabilidade e durabilidade da mesma e para atender às necessidades estruturais, ambientais, arquitetônicas e económicas. Não existe um tipo de cimento que possa satisfazer todas as necessidades de construção. Isso, porque cada tipo de cimento corresponde a uma dada exigência, como dever assegurar um endurecimento rápido e baixo calor de hidratação, ou como, por exemplo, para aumentar a taxa de hidratação.

A determinação da classe de exposição do betão é o fator mais importante a ser considerado. Isso, porque o betão sofre deteriorações provocadas pelas condições ambientais a que está exposto, de reações químicas expansivas internas (reações álcalis-agregado e reações sulfáticas), ou de outras ações normalmente tratadas no cálculo estrutural (tais como ações térmicas, fluência, retrações e desgaste). No que se refere às questões ambientais (que provocam deteriorações no betão), estão classificadas na NP EN 206-1 em 6 grupos, dos quais 3 são relativos à deterioração do betão por corrosão das armaduras, por ação do dióxido de carbono e por ação dos cloretos, neste caso provenientes quer da água do mar quer de outras origens ⁽⁰⁹⁾.

Ainda desse grupo, duas são relativas à deterioração do betão pela ação do gelo/degelo ou pelo ataque químico, sendo que o último será relativo ao fato de não existir o risco de deterioração dos metais ou de ataques no betão (ou seja, quando se trata de um ambiente não agressivo à estrutura) ⁽⁰⁹⁾.

Nos quadros 3 a 7 estão enumerados todos os grupos referentes às classes de exposição do betão, com a respetiva descrição do ambiente e com exemplos informativos para cada uma das classes:

• **Sem risco de corrosão ou ataque:**

Classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos
X0	Para betão sem armaduras: Todas as exposições, exceto ao gelo/degelo, à abrasão ou ao ataque químico.	Betão enterrado em solo não agressivo; Betão permanentemente submerso em água não agressiva; Betão com ciclos de molhagem/secagem não sujeitos a abrasão, gelo/degelo ou ataque químico.
	Para Betão armado: Muito seco.	Betão armado em ambiente muito seco; Betão no interior de edifícios com muito baixa humidade do ar.

Quadro 3: Sem risco de corrosão ou ataque ⁽⁰⁹⁾.

• **Corrosão induzida por carbonatação:**

Classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos
XC1	Seco ou permanentemente húmido.	Betão armado no interior de edifícios ou estruturas, com exceção das áreas com humidade elevada; Betão armado permanentemente submerso em água não agressiva.
XC2	Húmido, raramente seco.	Betão armado enterrado em solo não agressivo; Betão armado sujeito a longos períodos de contato com água não agressiva.
XC3	Moderadamente húmido.	Superfícies exteriores de betão armado protegidas da chuva transportada pelo vento; Betão armado no interior de estruturas com moderada ou elevada humidade do ar.
XC4	Ciclicamente húmido e seco.	Betão armado exposto a ciclos de molhagem/secagem; Superfícies exteriores de betão armado expostas à chuva ou fora do âmbito da XC2.

Quadro 4: Corrosão induzida por carbonatação ⁽⁰⁹⁾.

• **Corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar:**

Classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos
XD1	Moderadamente húmido.	Betão armado de partes de pontes afastadas da ação direta dos sais descongelantes, mas expostas a cloretos transportados pelo ar.
XD2	Húmido, raramente seco.	Betão armado completamente imerso em água contendo cloretos (piscinas).
XD3	Ciclicamente húmido e seco.	Betão armado diretamente afetado pelos sais descongelantes ou pelos salpicos de água contendo cloretos; Betão armado em que uma das superfícies está imersa em água contendo cloretos e outra exposta ao ar.

Quadro 5: Corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar ⁽⁰⁹⁾.

• **Corrosão induzida por cloretos da água do mar:**

Classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos
XS1	Ar transportando sais marinhos, mas sem contato direto com água do mar.	Betão armado em ambiente marítimo saturado de sais; Betão armado em áreas costeiras perto do mar, diretamente exposto e a menos de 200m do mar, esta distância pode ser estendida até 1 km nas costas planas e foz de rios.
XS2	Submersão permanente.	Betão armado permanentemente submerso.
XS3	Zona de marés, de rebentação e de salpicos.	Betão armado sujeito às marés ou aos salpicos, desde 10m acima do nível superior das marés, até 1m abaixo do nível inferior das marés; Betão armado em que uma das superfícies está imersa em água do mar e a outra exposta ao ar (exige medidas de proteção suplementares).

Quadro 6: Corrosão induzida por cloretos da água do mar ⁽⁰⁹⁾.

• **Ataque pelo gelo/degelo:**

Classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos
XF1	Moderado número de ciclos de gelo/degelo, sem produtos descongelantes.	Betão em superfícies verticais expostas à chuva e ao gelo; Betão em superfícies não verticais, mas expostas à chuva ou gelo.
XF2	Moderado ciclos de gelo/degelo, com produtos de descongelantes.	Betão, tal como nas pontes, classificável como XF1, mas exposto aos sais descongelantes direta ou indiretamente.

Quadro 7: Ataque pelo gelo/degelo ⁽⁰⁹⁾.

No entanto, está prevista a possibilidade de se combinarem diferentes classes de exposição, nomeadamente a norma NP EN 206-1 na seção 4.1, que estabelece as condições ambientais às quais o betão está sujeito, refere que podem ser expressas como uma combinação de classes de exposição e acrescenta que as diferentes superfícies de um elemento estrutural podem estar sujeitas a diferentes ações ⁽⁰⁹⁾. Essas combinações podem ser feitas de acordo com o quadro abaixo:

• **Combinações de classes de exposição:**

XC2	XD2;
	XS2 + ataque pela água do mar (XA1);
	XF1;
	XA1, XA2 ou XA3.
XC3 ou XC4	XF1;
	XD1 + XF2;
	XS1;
	XD3;
XC4	XS3 + ataque da água do mar (XA1).
	XA1, XA2 ou XA3.

Quadro 8: Combinações de classes de exposição ⁽⁰⁹⁾.

Importa ainda salientar o seguinte ⁽⁰⁹⁾:

- As classes de exposição X0 e, em geral, a XC1 aplicam-se isoladamente;
- A carbonatação é um processo comum a todas as estruturas de betão e a ação dos cloretos ou os ataques químicos e por gelo/degelo são específicos de certos ambientes;

- Na orla marítima (classe XS), o número de dias com temperaturas negativas (onde se poderia aplicar a classe XF) é despreciable, enquanto no interior, nomeadamente nas zonas com um total de 30 ou mais dias com temperaturas negativas, pode haver combinação da classe XF2 com a XD;
- O ataque químico ao betão de fundações, obras de suporte de terras ou pavimentos em contato com os solos dá-se em solos agressivos ou em águas agressivas com nível freático atingindo as fundações e ao betão de superestruturas de reservatórios ou condutas por ação de águas agressivas.

Em cada uma das classes de exposição ambiental, devem estar satisfeitos os valores da mínima dosagem de cimento, da máxima razão água/cimento (e do teor de ar, se for o caso) e da classe de resistência. No caso de o cimento não ser comum às diferentes classes de exposição, prevalece aquele que satisfaz a classe com os requisitos mais exigentes ⁽⁰⁹⁾.

3 - Tipos de ataques químicos ao betão.

Regra geral, a deterioração do betão é iniciada por processos químicos, embora existam fatores físicos e mecânicos que também estão envolvidos, aliados ou não, com os processos químicos⁽¹⁰⁾.



Figura 15: Percolação de água e ocorrência de depósitos e incrustações calcárias na UnB, Brasília, Brasil.

Nesse caso, podem-se distinguir outros tipos de deterioração, como, por exemplo, os desencadeados por processos biológicos ou, ainda, os eletroquímicos, como é o caso da corrosão de armaduras no interior das estruturas de betão armado ⁽¹⁰⁾.

As tentativas de classificar a deterioração do betão têm sido feitas ao longo dos anos, no entanto, uma das classificações originais é a de Moskvin et al.¹². Este autor descreveu três classes de deterioração, ou seja, a lixiviação, o efeito das gorduras animais, e ataque de sulfatos. A classificação foi primeiramente orientada aos processos químicos, mais recentemente, o "Guia de betão durável" da ACI¹³, reconheceu cinco classes de deterioração do betão (11):

- Congelamento e descongelamento;
- Exposição a substâncias químicas agressivas;
- Abrasão;
- A corrosão do aço e outros materiais incorporados no betão;
- As reações químicas com os agregados.

Popovics¹⁴ propôs uma classificação diferente, com base no "mecanismo" do ataque (11):

Classe	Classificação do tipo de ataque
I	Lixiviação;
II	Reações não ácidas;
II A	Permuta Básica;
II B	Reações de saponificação;
II C	Reações com açúcares;
III	Reações envolvendo expansão excessiva;
III A	Ataque por sulfatos sobre os aluminatos;
III B	Reações álcali-agregado;
IV	Reações com águas ácidas;
V	Outros processos físicos que não sejam mecânicos;
V A	Soluções salinas causando eflorescência;
V B	Congelamento e descongelamento;
VI	Deterioração mecânica;
VI A	Abrasão;
VI B	Fendilhação excessiva, expansão térmica, etc.

Quadro 9: Classificação dos tipos de ataque segundo Popovics (11).

Deve-se ressaltar que as reações químicas se manifestam de diferentes formas, tais como num aumento da porosidade e permeabilidade, na diminuição da resistência do betão, e no surgimento de fissuras e escamação do betão. Na prática, vários processos químicos e físicos de deterioração podem agir ao mesmo tempo e podem reforçar-se mutuamente(11).

Assim sendo a maioria dos processos físicos e químicos que podem afetar a durabilidade das estruturas de betão, envolvem dois fatores predominantes: Os mecanismos de transporte através dos poros e das fissuras (por difusão, sucção capilar ou pressão hidráulica), e a presença de água. Dessa forma, a permeabilidade e a capacidade de absorção são as propriedades do betão que estão diretamente relacionadas com a resistência ao ataque químico da pasta de cimento. A durabilidade do betão é assim essencialmente condicionada por essas

¹²Moskvin, V. M., Ivanov, F. M., Alexeyev, S. N. and Guzeyev, E. A., 'Corrosion of concrete and reinforced concrete', in 'Methods of Protection' (in Russian), (Moskva Stroyizdat, 1980).

¹³American Concrete Intitution, ACI Committee 201, 'Guide to Durable Concrete', ACI 201 2R-77 (American Concrete Institute, Detroit, 1977).

¹⁴Popovics, S., 'A classification of the deterioration of concrete based on mechanism', in 'Concrete Durability', ACI Publication SP-100, Vol. 1 (American Concrete Institute, Detroit, 1987).

duas propriedades, ambas diretamente influenciadas pela porosidade. Tendo em conta que todos os fatores existentes que afetam a porosidade do betão interferem também na sua permeabilidade e na sua capacidade de absorção, isso significa que acabam por interferir também na sua resistência ao ataque químico. De entre estes fatores, destacam-se ⁽¹⁰⁾:

- Razão água/cimento;
- Quantidade, composição e finura do cimento;
- Aderência entre pasta e o agregado;
- Presença e quantidade de adições e de aditivos;
- Qualidade da execução;

Como foi dito anteriormente, a fissuração proporciona um fácil acesso para que os agentes agressivos penetrem no betão e iniciem sua ação danosa na estrutura. As fissuras ocorrem sempre que a tensão no betão for maior do que a sua resistência à tração, que é reconhecidamente baixa. A formação dessas fissuras está diretamente relacionada com a exsudação¹⁵, o fenómeno caracterizado pelo deslocamento da água da mistura em direção à superfície, e com a velocidade de evaporação desta água, quando o betão ainda está fresco. No entanto, as fissuras que ocorrem após o endurecimento da massa (antes de serem aplicadas as cargas) podem resultar de ⁽¹⁰⁾:

- Retração por secagem;
- Movimentações de origem térmica ou de:
 - Reações álcalis-agregado;
 - Reações sulfáticas.
- Corrosão das armaduras;
- Ciclos gelo/degelo;
- Ciclos alternados de molhagem e secagem;
- Assentamentos diferenciais do solo da fundação;

O betão fresco quando exposto ao sol e a ação do vento perderá muito rapidamente (por meio da evaporação) a água da mistura, antes mesmo que tenha endurecido. Como essa água é indispensável, a sua perda provocará a redução da resistência do betão.

Por isto é muito importante impediressa evaporação, ou seja, proceder a cura do betão, que consiste na garantia de água à suficiente para que todo o processo de reação química do cimento se complete, se tal não ocorrer o betão ficará sujeito à fissuras em sua superfície. Um betão não curado, ou mal curado, terá a sua resistência mais baixa, além de ser muito vulnerável aos agentes agressivos, devido a grande quantidade de fissuras que se formam, às vezes imperceptíveis a olho nu.

As fissuras excessivas que poderão surgir após a aplicação do carregamento ocorrem devido a falhas estruturais. A estrutura dos poros e a configuração das fissuras são os principais fatores intervenientes na velocidade, na extensão e nos efeitos dos mecanismos de transporte de agentes agressivos no interior do betão, expondo assim o interior da estrutura às condições ambientais (humidade e temperatura) ⁽¹⁰⁾.

Os mecanismos mais importantes de deterioração das estruturas de betão são ⁽¹⁰⁾:

¹⁵ De acordo com o Eng. Civil Renato Rodrigues Avelino, exsudação é o termo usado para designar o fenómeno migratório das águas existentes na composição do betão para o seu exterior preferencialmente de forma lenta.

- **Mecanismos de deterioração relativos ao betão** (10).

Lixiviação:

A lixiviação é geralmente mais pronunciada perto de fendas e juntas ou em áreas de faveolamento¹⁶. Em locais onde a água pode passar através do betão, formam-se depósitos brancos de carbonato de cálcio na superfície, devido à reação do hidróxido de cálcio com o dióxido de carbono (CO₂) do ar. Este fenómeno é conhecido como eflorescência¹⁷. Na pasta de cimento hidratado, o hidróxido de cálcio é o componente mais sensível. Em teoria, a hidrólise da pasta de cimento pode ocorrer e continuar, até que a maioria do hidróxido de cálcio tenha sido lixiviado (e com isso “expulso” do betão)⁽¹¹⁾.

Isso expõe outros componentes cimentícios à decomposição química. Eventualmente, o processo deixa visível o gel de sílica e de alumina, ambos com pouca ou nenhuma resistência. Além da perda de força, a lixiviação do hidróxido de cálcio pode ser considerada indesejável por razões estéticas (11).



Figura 16: Ataques por lixiviação na base de um pilar de um viaduto que esteve em contato com a água (11).

Dessa forma, a patologia básica é uma superfície arenosa ou com agregados expostos sem a pasta superficial, eflorescências de carbonatos, elevada retenção de fuligem e risco de desenvolvimento de fungos, com consequente redução do pH do estrato aquoso dos poros superficiais.

Expansão por ataque por sulfatos:

¹⁶ O faveolamento ocorre durante a betonagem, quando os agregados não se misturaram com a pasta de cimento, formando bolsões de ar, para os evitar, deve-se vibrar o betão, com o auxílio de vibradores.

¹⁷ Eflorescências são depósitos cristalinos de cor branca que surgem na superfície do betão, através da migração dos sais transportados pela água utilizada na elaboração ou que está em contato com o betão.

Segundo K.R.Lauer (1990), os ataques por sulfatos têm sido relatados mais recentemente na região do Golfo no leste da Arábia Saudita. Quando o cimento Portland entra em contato com os íões sulfato, a portlandite e os aluminatos de cálcio hidratados do cimento combinam-se com o íão sulfato formando gesso e etringite (trisulfoaluminato de cálcio hidratado – $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$). Existe um consenso geral de que as expansões por sulfatos estão associadas à formação de etringite. Os mecanismos que causam a expansão, no entanto, ainda são controversos, e incluem o aumento da pressão por crescimento de cristais de etringite e o aumento de volume devido à adsorção de água ⁽¹¹⁾. A norma E464 do LNEC (mencionada anteriormente) contém os valores para a modelação da durabilidade do betão.



Figura 17: Expansão por ataques por sulfatos e por corrosão em zona próxima ao mar ^[12].

A patologia geralmente apresentada (e dependendo do tipo de sulfatos) é de uma superfície com fissuras aleatórias, esfoliação e redução significativa da dureza e resistência superficial do betão, com conseqüente redução do pH do estrato aquoso dos poros superficiais (tratados em pormenor no capítulo 3.4). A exposição aos sulfatos foi classificada pelo Building Code of the American Concrete Institute¹⁸ em quatro graus de severidade ⁽¹¹⁾:

- I - Ataque negligenciável: O conteúdo de sulfatos no solo é inferior a 0.1%, ou a 150 p.p.m. na água;
- II - Ataque moderado: O conteúdo de sulfatos no solo é entre 0.1 a 0.2%, ou entre 150 a 1500 p.p.m. na água;
- III - Ataque severo: O conteúdo de sulfatos no solo é entre 0.2 a 2%, ou entre 1500 a 10000 p.p.m. na água;
- IV - Ataque muito severo: O conteúdo de sulfatos no solo é superior a 2%, ou superior a 10000 p.p.m. na água.

Reações superficiais deletérias:

¹⁸Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83), Table 4.5.3.

Este tipo de reações incluem-se os problemas oriundos com ligantes e agregados que contêm substâncias prejudiciais, por exemplo cal viva ou sulfuretos de ferro, que acarretam manchas, cavidades e protuberâncias na superfície das estruturas de betão.



Figura 18: Reações superficiais deletérias, Museu Nacional de Brasília, Brasil.

Expansão por reações álcalis-agregado:

Certos agregados possuem minerais reativos aos álcalis, isto é, contêm formas de sílica amorfas, mal cristalizadas ou deformadas, como a opala, calcedónia, etc., que reagem com os iões alcalinos e hidroxilos do cimento em presença de elevada humidade para formarem compostos fortemente expansivos que originam fissuração e expansão no betão. Este tipo de agregados pode existir em todos os tipos de rochas, como granitos e calcários. A sintomatologia básica é uma expansão geral da massa de betão, com fissuras superficiais e profundas.

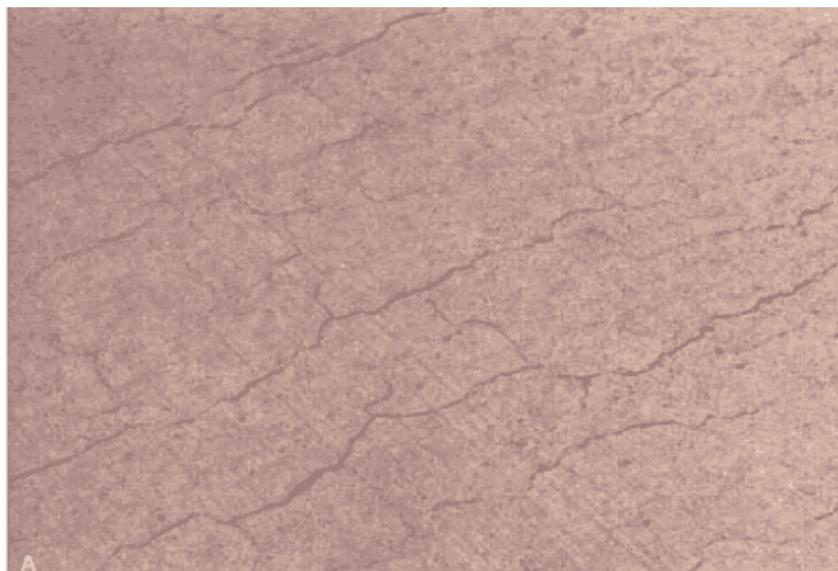


Figura 19: Fissuração por reação álcalis-agregado [13].

Dados laboratoriais e de campo têm mostrado que cimentos Portland contendo mais de 0,6% de óxido de sódio (Na_2O) ou equivalente (soma dos teores dos óxidos de sódio e potássio), quando utilizado em combinação com um agregado reativo aos álcalis, pode causar grandes expansões devido às reações álcali-agregado. Em betões com grande quantidade de cimento, uma quantidade inferior a 0,6% de Na_2O no cimento, pode ser nociva. Investigações na Alemanha e Inglaterra têm mostrado que, se o teor de álcalis total no betão for inferior a 2,5 kg/m^3 , os danos resultantes da reação álcalis-agregado, provavelmente não ocorrerão (11).

• **Mecanismos de deterioração relativos às armaduras** (10).

Despassivação por carbonatação:

O fenómeno não é perceptível a olho nu; ele não reduz a resistência do betão e até pode aumentar a sua dureza superficial. A penetração de dióxido de carbono gasoso dentro do betão parcialmente saturado geralmente inicia uma série de reações com ambos os iões dissolvidos nos poros e na pasta hidratada de cimento. Todo o processo pode ser resumido como uma série de diferentes etapas (12):

- O dióxido de carbono gasoso penetra no material, e em seguida, dissolve-se no sistema de poros, principalmente como anião bicarbonato (HCO_3^-) e ião carbonato (CO_3^{2-});
- O CO_3^{2-} reage com o cálcio em solução para precipitar calcite¹⁹, carbonato de cálcio (CaCO_3), e em outras fases sólidas, por exemplo, o monocarboaluminato de cálcio;
- A diminuição do pH associado a essas reações leva à dissolução da portlandite²⁰.



Figura 20: Despassivação das armaduras por carbonatação, viaduto Flamboyant, Goiânia, Brasil [14].

¹⁹ A Calcite^(português europeu) ou Calcita^(português brasileiro), junto com a aragonita, é um mineral com composição química CaCO_3 , com clivagem romboédrica perfeita. É muito mais estável e menos solúvel em água que a aragonita.

²⁰ A portlandite (hidróxido de cálcio cristalino) é a segunda fase mais abundante nas pastas hidratadas de cimento Portland e está presente na forma de agregados cristalinos relativamente grandes que podem ser facilmente distinguidos do resto da pasta por microscopia ótica.

O mecanismo de carbonatação, juntamente com os valores críticos para a pressão parcial de CO_2 (P_{CO_2}), é apresentado no trabalho realizado por T. Matschei, B. Lothenbach e F.P. Glasser (2007) ⁽¹²⁾.

Adiminuição do pH, associado ao processo tem um efeito negativo sobre as estruturas de betão armado, já que destrói a camada passiva em torno do aço, expondo-o à corrosão ⁽¹²⁾. Esta origina de seguida o aparecimento de manchas, fissuras, destacamentos e até perda da seção resistente e da aderência, promovendo o colapso da estrutura ou de partes dela. A identificação da frente ou profundidade de carbonatação requer ensaios específicos.

Despassivação por iões cloreto:

O ingresso de cloretos e o seu papel na iniciação da corrosão foi o processo que motivou o desenvolvimento dos primeiros modelos dedicados à análise da durabilidade a longo prazo das estruturas de betão ⁽¹²⁾.



Figura 21: Despassivação das armaduras por ingresso de iões cloreto, Doca do Bom Sucesso, Lisboa, Portugal.

Os iões cloreto podem ser introduzidos no betão durante a sua amassadura (por exemplo, por excesso de aditivos aceleradores de endurecimento) ou pelo exterior (por exemplo, em contato com água do mar).

No mecanismo da corrosão do aço devido ao ingresso de cloretos, o primeiro passo a considerar, é a resistência física à penetração de todos os líquidos no betão, reduzindo a razão água/cimento, e a cura do betão. Por contraste com a química complexa do processo de ataque por sulfatos, a penetração de iões cloreto é mais física. O teor limite de cloretos para ocorrer à corrosão do aço é consensual, mas a maioria dos autores referem valores da ordem dos 0.2 a 0.4% da massa de cimento ⁽¹³⁾.

Tal como na carbonatação, e antes de entrar numa fase avançada, este fenómeno não é perceptível a olho nu e também não reduz a resistência do betão, nem altera seu aspeto

superficial. A identificação da frente ou da profundidade de penetração de certo teor de íões cloreto requer ensaios específicos, no entanto ao atingir a armadura, este ataque químico pode causar séria corrosão, com aparecimento de manchas, fissuras, destacamentos e até perda da seção resistente e da aderência, promovendo o colapso da estrutura ou de suas partes.

3.1 - Ataques pela água doce.

A água doce pode atacar o betão, como também pode facilitar outros tipos de ataques. Geralmente as patologias provocadas pela água doce estão associadas às obras hidráulicas, onde, por exemplo, o grande problema existente nos canais de betão é o desgaste, provocado pelos corpos sólidos em suspensão que desgastam por abrasão o fundo e as partes laterais. Além disso, em barragens, onde a água pode circular com grandes velocidades, pode ocorrer o fenômeno de cavitação. É de referir que, relativamente à resistência à abrasão mecânica na água, são os agregados graúdos que têm o papel primordial de proteger os elementos mais finos, ao passo que na cavitação²¹ esses são os elementos mais importantes.

A cavitação consiste na formação de bolhas ou cavidades em um líquido. Em estruturas hidráulicas (onde o líquido em causa é a água doce), as cavidades existentes serão preenchidas com vapor de água e ar. Nessas cavidades a pressão local cairá para um valor abaixo de uma atmosfera (atm.²²), o que irá provocar a vaporização da água (na temperatura ambiente na qual o fluído se encontra) (14).

A queda de pressão causada por essas irregularidades é geralmente abrupta e é causada pelas altas velocidades na qual o fluido se desloca e pelas curvas existentes nos dutos por onde a água se deslocará. As cavidades, muitas vezes começam a se formar perto das curvas ou nos pontos de diminuição ou alargamento de diâmetro (no duto, onde a água se desloca), no limite de fluxo ou nos centros de vórtices (14).

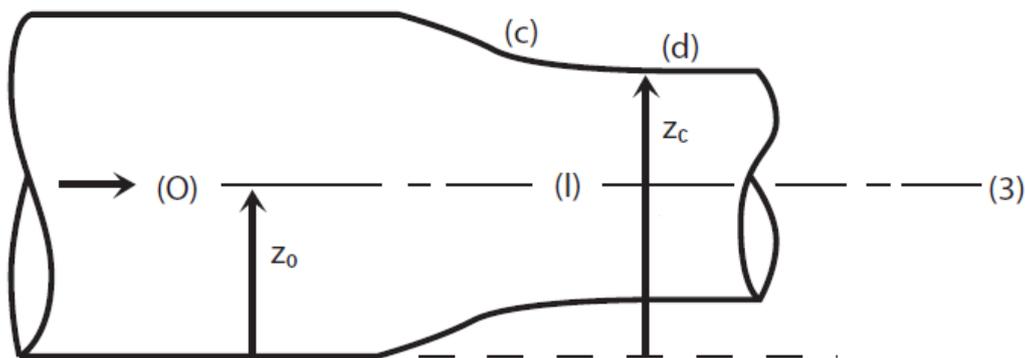


Figura 22: Diminuição do diâmetro no duto (adaptado).

²¹ A cavitação é um fenômeno originado em quedas repentinas de pressão, geralmente observado em sistemas hidráulicos. A combinação entre a pressão, temperatura e velocidade, origina ondas de choque e micro-jatos altamente energéticos, causando a aparição de altas tensões mecânicas e elevação da temperatura, provocando danos na superfície atingida.

²² O termo atmosfera (símbolo: atm) refere-se a uma unidade de pressão. Esta unidade é reconhecida, mas não recomendada, por não pertencer ao Sistema Internacional de Unidades (SI). O SI recomenda o uso da unidade de pressão pascal (símbolo Pa).

Quando a geometria dos dutos é alterada (por exemplo, na diminuição ou alargamento do diâmetro do duto), a pressão vai cair na direção do centro de curvatura ou na direção ao longo das linhas convergentes do duto. Na figura 22, no local onde se verifica uma contração do duto C, é um local em que uma nuvem de cavidades pode começar a se formar e, emseguida, entrar em colapso no ponto D. A velocidade próxima no ponto C é muito maior do que a velocidade média no túnel a montante, e as linhas de corrente perto de ponto C serão curvas. Assim, para valores adequados de vazão e pressão do túnel em O, a pressão local perto do ponto C passará para a pressão de vapor de água e o fenômeno de cavitação irá ocorrer ⁽¹⁴⁾.

As bolhas criadas irão crescer e viajar com a água que flui para um espaço onde o campo de pressão causará colapso. Os danos da cavitação podem começar nesse ponto, quando uma bolha colapsa ou implode (cavitação), próximo ou contra uma superfície sólida, uma pressão extremamente alta é gerada, que atua em uma área infinitesimal da superfície por um período de tempo muito curto. Uma sucessão desses impactos de alta energia pode danificar quase todo o material sólido, entre eles betão, aço, ou qualquer outro material resistente utilizado ⁽¹⁴⁾.

Os danos da cavitação ocorrem quando as bolhas preenchidas com vapor colapsam. Os colapsos que ocorrem perto do ponto D (figura 22), produzirão altas pressões (de forma instantânea), que terão impacto sobre as superfícies de contorno e causarão corrosão, ruído e vibração. Crateras provocadas por fenômenos de cavitação são facilmente distinguidas da aparência desgastada por abrasão ⁽¹⁴⁾.



Figura 23: Efeitos da cavitação, Miranda, 1966 ^[15].

A progressão da erosão por cavitação no betão não é tão bem documentada como é em metais. Para ambas as classes de material, no entanto, a erosão progride rapidamente após um período inicial de exposição da superfície, ficando ligeiramente áspera e com crateras de pequena dimensão ou “perfurações”. Possíveis explicações para esses fenômenos de erosão são ⁽¹⁴⁾:

- O material imediatamente abaixo da superfície é mais vulnerável a ataques;
- Os impactos da cavitação são focalizados pela geometria dos próprios poços;

- A estrutura do material foi enfraquecida pela carga repetida (fadiga).

Em qualquer caso, a fotografia na figura 23 mostra claramente uma tendência para a erosão seguir a argamassa da matriz e prejudicar o conjunto. Graves danos de cavitação normalmente formam uma configuração na forma de “árvore de Natal” em superfícies, vertedouros e calhas a jusante do ponto de origem ⁽¹⁴⁾.

As microfissuras existentes na superfície e entre a argamassa e agregado graúdo, podem contribuir para os danos da cavitação. As ondas de compressão na água que preenche os interstícios podem produzir tensões de tração que provocam propagação das microfissuras. Posteriormente, as ondas de compressão podem soltar fragmentos do material. O colapso simultâneo de todas as cavidades em uma grande nuvem, ou o colapso supostamente mais lento de um vórtice de grande porte, muito provavelmente é capaz de exercer, de repente, mais de 100 atmosferas de pressão sobre uma área de muitos centímetros quadrados. Barulho e vibração estrutural atestam a violência do impacto. A propagação de uma sequência de golpes pode causar e propagar fissuras, entre outros danos, fazendo com que pedaços de material se soltem.



Figura 24: Efeitos da cavitação, Miranda, 1974 ^[16].

O ataque causado pela água doce nas estruturas é o resultado da perda da alcalinidade do betão por infiltrações de água pelo subsolo, por exemplo, ou por outras fontes. Isso facilitará, por exemplo, o ataque pelos íões cloreto, visto que a alta alcalinidade do betão serve como uma barreira protetora. Sem essa proteção, ocorrem os fenômenos de corrosão das armaduras, e todos os outros fenômenos relacionados aos ataques por cloretos.

Os compostos presentes no cimento Portland endurecido são atacados pela água, sais e por soluções ácidas. Felizmente, na maioria das estruturas hidráulicas, a ação deletéria sobre a massa de betão de cimento Portland endurecido com uma baixa permeabilidade é tão lenta que não é importante. No entanto, há situações em que o ataque químico pode tornar-se grave e acelerar a deterioração e erosão do betão. Por exemplo, os ambientes ácidos podem causar deterioração nas superfícies expostas de betão ⁽¹⁴⁾.

O meio ácido pode variar de baixas concentrações, caso de ácidos encontrados na água mineral, a concentrações elevadas, por exemplo, os ácidos encontrados em locais com águas com excesso de plantas. Ambientes alcalinos também podem causar deterioração do betão, ao aumentar o seu pH. Na presença de humidade, solos alcalinos contendo sulfatos de magnésio, sódio, cálcio atacam o betão, formando compostos químicos que absorvem água e que aumentam de volume, podendo danificar o betão. O sulfureto de hidrogénio é a origem de uma forma de ataque ácido, sendo muito comum em sistemas sépticos sanitários. Sob certas condições, essa corrosão pode ser muito grave e causar a falha prematura de um sistema sanitário (14).

A cal hidratada²³ é um dos compostos que se formam quando o cimento e a água se combinam. É facilmente dissolvida pela água (e de forma mais agressiva), dissolvida pela água mineral pura (encontrada, por exemplo, em alguns riachos). Quando o dióxido de carbono está dissolvido na água em quantidade suficiente para fazer a água ligeiramente ácida, isso aumentará a sua agressividade (14).



Figura 25: Percolação de água e grande ocorrência de depósitos e incrustações calcárias, UnB, Brasília, Brasil.

Segundo um artigo do ACI (ACI 210R-93), os países escandinavos²⁴ têm relatado ataques graves por água doce, tanto em superfícies expostas de betão, como em superfícies interiores de condutas onde a porosidade ou fissuras deram acesso à água. Nos Estados Unidos, há muitos casos em que a superfície do betão tem sido atacada por água doce que flui por ele, mas danos sérios com essa origem são raros (Hollandet al. 1980). Este ataque é particularmente evidente na execução de obras hidráulicas de escoamento das montanhas altas nas Montanhas Rochosas e as Montanhas Cascade dos Estados Unidos. Uma pesquisa (ICOLD 1951) da composição química da água bruta em diversos reservatórios nos Estados Unidos indica um equilíbrio quase neutro ácido-alcalino (pH) para a maioria destas águas (14).

²³ A cal hidratada tem características aglomerantes como o cimento, sendo que, enquanto o cimento reage com água (reação de hidratação do cimento), o endurecimento da cal aérea ocorre pelo contato com o ar. Essa reação transforma a cal hidratada num carbonato tão sólido quanto o calcário que a originou.

²⁴ A Escandinávia é formada por 4 países: Dinamarca, Noruega, Suécia e Finlândia.

A decomposição da vegetação é a fonte mais frequente de acidez em águas naturais. A decomposição de certos minerais pode ser uma fonte de acidez em algumas localidades. Água corrente, que tem um pH da ordem dos 6,5 poderá causar a lixiviação do betão, reduzindo sua resistência e tornando-o mais poroso e menos resistente ao congelamento e descongelamento e aos ataques químicos. A quantidade de cal lixiviada no betão é uma função da área exposta e do volume de betão. Drenos finos e de pequeno diâmetro irão deteriorar-se em poucos anos, quando expostos às águas levemente ácidas, enquanto tubos grossos e estruturas maciças não serão danificados significativamente por muitos anos sob a mesma exposição, desde que a cobertura sobre o aço de reforço atenda aos padrões de design normais ⁽¹⁴⁾.

As águas que fluem de leitos de turfa podem ter um pH da ordem de 5. Águas com esse pH irão atacar fortemente e de forma agressiva o betão, e por esta razão, quando as condutas de betão para as águas subterrâneas estão sendo projetados, a agressividade da água deveria ser testada para determinar sua compatibilidade com o betão. Isto é particularmente crucial em condutas de pressão ⁽¹⁴⁾.



Figura 26: Tentativa fracassada de reparação da percolação de água, ainda se verifica a ocorrência de depósitos e incrustações calcárias, UnB, Brasília, Brasil.

O ataque por água doce provoca a lixiviação²⁵, que consiste na ação extrativa ou de dissolução que os compostos hidratados da pasta de cimento podem sofrer quando em contato com águas, principalmente puras ou ácidas; tem como principal consequência a perda de resistência mecânica, comprometendo assim a vida útil das estruturas de betão, com graves consequência nomeadamente em represas, barragens e instalações destinadas ao armazenamento de resíduos nucleares⁽¹⁵⁾.

Não menos importante, são os seus efeitos sobre a redução da alcalinidade da pasta de cimento, que leva à corrosão das armaduras, como pelo aumento da porosidade, que facilita a ocorrência dos principais mecanismos de transporte que induzem à deterioração química do betão (Cascardo, 1997) ⁽¹⁵⁾.

²⁵ A lixiviação é o processo de extração de uma substância presente em componentes sólidos através da sua dissolução num líquido.

Um método que tem sido testado é a aplicação de materiais isolantes que separem o betão da água livre, para que, esta não entre em contato com a superfície do betão.

Relativamente às barragens, existem inúmeros relatos de deterioração do betão pela ação de águas agressivas que informam sobre a formação de regiões de percolação²⁶, as quais podem, com o tempo, causar danos à estrutura, principalmente devidos ao aumento da porosidade do betão e pela redução da resistência mecânica. Segundo GONTIJO et al. (1995) foram necessárias intervenções de reparação na estrutura de forma a manter a sua integridade ou, dependendo da intensidade do ataque ocorrido, a sua inutilização como o ocorrido nas barragens de Avon (Austrália) e Drum Afterbay (EUA).



Figura 27: Barragem Avon na Austrália [17].

No entanto, a água doce é um dos ingredientes essenciais à criação da pasta de cimento, portanto a água doce irá intervir em todas as etapas da vida do material, essencialmente nas suas propriedades mecânicas e físico-químicas. É a água doce que confere ao betão a sua plasticidade, permitindo que o betão flua e seja moldável, sendo ela que garante a hidratação do cimento (16).

Quase toda água evaporável será perdida, deixando poros vazios ou não saturados. Assim, o betão é um material que, por sua própria constituição, é necessariamente poroso, pois não é possível preencher a totalidade dos vazios com uma pasta de cimento. A interconexão entre os vazios (ou poros) no betão torna-o permeável à água (16).

A água de amassadura é toda a água potável ou não, que não apresente cheiro nem sabor, utilizada para a fabricação do betão. A água de amassadura influi nas propriedades do betão através das substâncias dissolvidas e em suspensão. As substâncias dissolvidas podem afetar as resistências mecânica e química do betão e das armaduras.

²⁶ Percolação se refere ao fluxo de água no interior do betão.

A água de amassadura para betões deve obedecer às condições técnicas gerais especificadas nos documentos normativos referenciados no anexo I:

Características		Documento Normativo	Exigências	
			Betão simples	Betão armado e betão pré-esforçado.
1	pH	NP 441	4	4
2	CQO (1) (mg/dm ³)	NP 1414	500	500
3	Teor de cloretos (mg/dm ³)	NP 423	4500(2)	600(2)
4	Resíduo em suspensão (mg/dm ³)	NP 380	5000	2000
5	Resíduo dissolvido (mg/dm ³)	NP 380	(3)	(3)
6	Teor de Sulfatos (mg/dm ³)	NP 413	2000	2000
7	Teor de carbonatos e hidrogeno carbonatos (mg/dm ³)	NP 421	(3)	(3)
8	Teor de potássio e sódio (4) (mg/dm ³)	E381	1000	1000
9	Teor de ortofosfatos (mg/dm ³)	E379	100	100
10	Teor de nitratos (mg/dm ³)	E382	500	500
11	Teor de sulfuretos (5) (mg/dm ³)	NP 1417	-	100
12	Teor de zinco (mg/dm ³)	E417	100	100

Quadro 10: Água de amassadura: Características, exigências e documentos normativos do betão.

- (1) - CQO – Consumo químico de oxigênio;
- (2) - Para concentrações superiores deverá verificar-se se o teor total de cloretos no betão não é superior a 1%, 0.4% ou 0.2%, no caso de betão simples, armado, ou pré-esforçado, respetivamente;
- (3) - Ver a referência sobre a verificação da conformidade;
- (4) - Só se os inertes forem potencialmente reativos;
- (5) - Só no caso de betão pré-esforçado e de caldas de injeção.

A água doce normalmente tem valores de pH entre 5 e 8.5, porém em algumas situações poderá chegar até valores de 4. Esses valores baixos devem-se à presença de substâncias ácidas, como por exemplo, os ácidos húmicos²⁷. O ácido húmico tem origem em resíduos orgânicos, nomeadamente de matéria orgânica em decomposição, e não é muito perigoso para as estruturas de betão devido à sua baixa solubilidade em água (Concrete Experts, 2002). No entanto, a água doce subterrânea que flui ao longo ou através de matéria orgânica em decomposição pode dar origem, entre outras substâncias, ao dióxido de carbono (17).

O dióxido de carbono transportado pode levar a uma diminuição do pH e pode causar a carbonatação da pasta de cimento e do hidróxido de cálcio (portlandite), dissolvendo assim o betão. Esse ataque envolve o ácido carbónico (H₂CO₃) e o bicarbonato de cálcio, Ca(HCO₃)₂, tal como se demonstra nas reações abaixo (17):



²⁷ Solução ácida resultante da extração de componentes orgânicos do solo ou do subsolo, mormente húmus, por soluções aquosas percolantes.

Cimento hidratado + $H_2CO_3 \rightarrow$ silicatos hidratados + aluminatos hidratados + hidratos de ferro



Figura 28: Substituição da barragem Drum Afterbay nos EUA em 1966 [18].

É de se salientar que a interação entre a superfície carregada do cimento e a água (solução de eletrólitos) cria uma camada iónica difusa que influencia a dispersão ou floculação dos grãos sólidos do cimento. A água, por fim, existe no estado combinado formado por água de solvatação ou cristalização ou por simples agrupamentos hidroxilos. O estudo da cinética da água nos poros e nos “canais capilares” (fluência e resistência ao congelamento) requer uma profunda compreensão dos fenômenos superficiais das partículas. Os avanços na química coloidal fornecem agora novas pistas sobre o funcionamento dos vários resultados experimentais (16).



Figura 29: Manchas provocadas pela ação das águas da chuva, Universidade de Brasília, Brasil.

No entanto, para o caso de estruturas de betão que apresentem fraturas, a água, ao penetrar no material, pode efetivamente induzir uma lixiviação importante desde que o cálcio presente na fratura possa ser evacuado em alta velocidade pelo fluxo de água. Este fenómeno de transporte de massa de cálcio pelo fluxo de água é referido como uma convecção de transporte de massa. Esse fenómeno tem sido estudado da mesma maneira como o processo de transporte difusivo de massa pura.

A água doce também irá atacar a portlandite, pois, de todos os componentes do cimento hidratado, a portlandite é o elemento mais solúvel. Ele pode ser dissolvido pelo ataque superficial ou por percolação nos poros do betão (Biczók, 1972). A portlandite irá assim emergir da estrutura através das fissuras (ou fraturas), existentes na mesma, formando eflorescências brancas de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ou de carbonato de cálcio (CaCO_3). A dissolução da portlandite pode ser acompanhada pela formação de novos compostos. Se eles são solúveis, os sais formados diminuem a resistência do betão. Se eles são insolúveis, elas podem, ao contrário, formar uma camada protetora. As diferentes reações que acompanham a dissolução da portlandite são retratadas na tabela que se segue, que mostra a ação dos ácidos em geral ⁽¹⁶⁾.

• 1º caso.

A portlandite entra em reação sem reagir.	Por exemplo, a água pura, de caráter anfotérico H^+, OH^-.
	A pasta de cimento é descalcificada por dissolução da portlandite, silicato de cálcio hidratado (CSH) e aluminato carbonato hidratado (C_4AH_{13}). O estágio final de degradação é a formação de geles de sílica ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) e/ou alumina ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$).
	Erosão

Quadro 11: Reações que acompanham a dissolução da portlandite ⁽¹⁶⁾.

• 2º caso.

A portlandite entra em solução e reage.	Ela forma um novo composto.
	<ul style="list-style-type: none"> • Forma uma camada protetora, constituída por um sal insolúvel. Ex: ácido carbónico (H_2CO_3) precipita CaCO_3. A ação de iões de dióxido de carbono (CO_2). • Forma uma camada não protetora, constituída por um sal solúvel. Ex: ácido clorídrico (HCl) e ácido nítrico (HNO_3) que levam à formação de cloreto de cálcio (CaCl_2) e nitrato de cálcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$).
	Erosão
	A ação de H_2SO_4 leva à formação de sulfato de cálcio pouco solúvel (mas as reações por parte dos componentes do cimento são muito importantes e garantem um estudo separado).

Quadro 12: Reações que acompanham a dissolução da portlandite ⁽¹⁶⁾.

Desta forma, pode-se concluir que a água pura terá uma tendência para remover a portlandite livre existente no cimento, deixando assim um esqueleto poroso. No entanto, esta reação é muito lenta, isto é, ocorre ao longo de grandes períodos de tempo, sendo, por isso,

raramente uma causa de preocupação. Mas, no caso de existir um importante gradiente hidráulico no betão, isso já será um fator de preocupação.

3.2 - Ataque pela água do mar.

Tal como foi visto para o caso dos ataques pela água doce, à durabilidade das estruturas de betão, nomeadamente as de betão armado, são diretamente afetadas e influenciadas pela água. A água atua como um agente de degradação e como um veículo de transporte de substâncias agressivas. É por isso que é importante utilizarem-se betões ditos impermeáveis e que proporcionem maior estanqueidade às estruturas. Mas, para que isto seja possível, é necessário que existam metodologias de análise e avaliação da permeabilidade do betão, que sejam expeditas, fiáveis e precisas ⁽¹⁸⁾.

Um número significativo de casos indicam que a corrosão das armaduras foi e ainda é a ameaça mais séria e crítica para a durabilidade e segurança de estruturas de betão em ambientes marinhos (Gjorv, 1968). A gravidade desse problema é demonstrada pelos muitos exemplos de fendas e destacamento do betão, causados pela corrosão das armaduras (Halstead e Woodworth, 1955) ⁽¹⁹⁾.



Figura 30: Patologia grave provocada pela ação da água do mar, onde todo o betão afetado pela ação da maré foi “eliminada” ^[19].

A corrosão ocorre rapidamente no betão poroso (o que o torna permeável), que está exposta, alternadamente aos respingos de água salgada e ao ar, como em zonas de maré e respingo. Cloretos, em concentrações variadas, são depositados no betão, levando à criação de reações eletroquímicas que causam a corrosão do aço. Os produtos da corrosão ocupam várias vezes o volume original do metal, o que pode levar ao desenvolvimento de pressões internas tão altas quanto 4700 psi (30 MPa), criando uma tensão, muitas vezes maior do que a resistência à tração do betão (Rosa et al., 1913). Fissuras formam-se ao longo do betão e,

acabameventualmente, cobrindo a totalidade da peça de betão. Isso permite o acelerar do processo corrosivo da armadura de aço ⁽¹⁹⁾.

No caso específico dos ataques pela água do mar, isso implica a sua ação em duas “frentes”. Uma delas é o ataque provocado nas estruturas de betão pelo contato direto com a água do mar. A outra é o ataque provocado pelo spray marinho nas estruturas próximas ao mar, mas que não chegam a entrar em contato com ela. Neste caso os iões cloreto (na forma de cloreto de sódio ou de magnésio) estão em suspensão no ar, sendo retirados do mar pelas ondas e transportados pelo ar podendo percorrer grandes distâncias, depositando-se sobre estruturas de betão na forma de gotículas de água. O maior problema provocado pelo spray marinho reside no fato dos iões cloreto (Cl⁻), que são muito pequenos, terem uma elevada mobilidade no interior do betão.

Quando um fluido agressivo, como a água do mar, atua na superfície externa de uma estrutura de betão, a deterioração provocada será gradual, ocorrendo à produção de uma camada de betão alterada. Como se tem constatado ao longo deste trabalho, a maioria dos problemas provocados pelos ataques químicos no betão é proveniente dos fluidos agressivos que penetram no interior dos poros do material, os estragos resultantes numa estrutura estão relacionados com a permeabilidade das camadas superficiais. A penetração dos constituintes agressivos de um fluido podem ocorrer nos poros do betão através de três forças:

- Difusão: Resultante da diferença de concentrações iónicas entre um fluido externo agressivo e o fluido interno nos poros do betão;
- Pressão hidrostática: As diferenças na pressão dos fluidos em superfícies opostas de um elemento estrutural resultam na penetração do fluxo hidráulico assim criado;
- Forças capilares: Penetração dos fluidos nos poros do betão devido a um mecanismo capilar.

Os ataques químicos pela água do mar podem dividir-se em 3 tipos:

- Por agentes químicos e físicos de degradação;
- Por agentes biológicos.

• **Agentes químicos de degradação:**

O ambiente marinho (ou nas suas proximidades) é regra geral, considerado o pior ambiente a curto e longo prazo para a implantação de estruturas de betão e de betão armado. Isso se deve à elevada agressividade da água do mar. Os oceanógrafos classificaram os elementos químicos distribuídos nos oceanos e seus diversos estados químicos, segundo a ordem de grandeza de sua concentração, em três grupos ⁽²⁰⁾:

- Elementos maiores: Cl (cloro), Na (sódio), S (enxofre), Mg (magnésio), Ca (cálcio) e K (potássio).
- Elementos menores: Br (bromo), C (carbono), Sr (estrôncio), B (boro), Si (silício) e F (flúor).
- Elementos Traços: N (azoto), Li (lítio), Rb (rubídio), P (fósforo), I (iodo), Fe (ferro), Zn (zinco).

Alguns compostos, como os que contêm sódio e potássio, são muito estáveis, enquanto outros, como os que contêm silício e magnésio, são relativamente instáveis. Os 6 iões mais abundantes da água do mar, que compõem juntos em torno de 99% dos sais do mar, são Cl^- , Na^+ , ião sulfato (SO_4^{2-}), Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ (21).

Deste modo, pode-se concluir que a agressividade química do ambiente marinho é devido essencialmente aos principais sais que estão dissolvidos na água do mar: cloreto de sódio, cloreto de magnésio, sulfato de magnésio, sulfato de cálcio, cloreto de cálcio, cloreto de potássio, sulfato de potássio e bicarbonato de cálcio. Uma estrutura de betão sujeita à ação da água do mar ficará sujeita à ação desses compostos, sendo que os que provocam mais danos serão, em primeiro lugar, os sais de magnésio e de sulfato, já que essa ação ocorre a longo prazo. Essa elevada agressividade do ambiente marinho nas estruturas de betão deve ser dividida em dois aspetos completamente distintos, com características de ataque distintas (21):

- Degradação do betão;
- Processos de corrosão das armaduras;
- Ação dos sais agressivos;
- À presença de iões cloreto;
- A alta humidade do ambiente.

Outro fator importante no estudo do ambiente marinho e na sua consideração no projeto de estruturas de betão e de betão armado diz respeito ao pH da água do mar. Apesar de ela ser fortemente influenciada pela atividade biológica, processos de fotossíntese, respiração e excreção, o pH da água do mar não sofre variações significativas. Os oceanos são considerados uma grande “solução tamponada”²⁸. Isso se deve às reações existentes entre o dióxido de carbono no ar (CO_2), o ácido carbónico (H_2CO_3) e o carbonato de cálcio (CaCO_3). O gás carbónico, derivado da respiração dos seres vivos e ponto de partida para a fotossíntese, quando borbulhado em água, sofre dissolução, formando ácido carbónico e, dessa forma, reduzindo o pH da água do mar. Por sua vez, o ácido carbónico reage com o carbonato de cálcio, provocando uma elevação do pH, conforme demonstrado na reação abaixo (21):



Os iões de hidrogênio, provenientes da dissociação do ácido carbónico, formam os iões bicarbonato (HCO_3^-) a partir de iões de carbonato, derivados da dissociação do carbonato de cálcio (CaCO_3), resultando no efeito de tamponamento da água do mar. Esse fato também foi comprovado por Morelli & Lima (22).

• Agentes físicos de degradação:

Para além dos agentes químicos, os ataques provocados pela água do mar englobam os fatores físicos de degradação, ou seja, a movimentação da água do mar por ação das ondas, correntes e marés. As forças da natureza provocam a movimentação das águas dos oceanos e mares, gerando não somente ondas, mas também as marés e correntes. O desequilíbrio da radiação solar origina ventos que levantam as ondas e produzem as ondulações (21).

²⁸ Uma solução tamponada é uma solução cujo valor de pH se mantém constante.

A fricção do ar que movimenta e pressiona as camadas superficiais da água acaba por gerar uma considerável movimentação de massas líquidas, fazendo com que a coluna de água não se mantenha homogênea. Com isso, existe a contribuição das ondas, que, apesar de possuírem apenas movimento de translação, possuem também movimentos aproximadamente circulares durante os seus movimentos ondulatórios (21).

Associado à movimentação das ondas está à variação de densidade e temperatura das diferentes massas de água. Isso acaba gerando correntes marinhas que são consideradas como verdadeiros rios dentro dos oceanos que influenciam diretamente as massas de água costeiras que estão em contato direto com as estruturas de betão. De entre os processos de movimentação da água do mar, as ondas e as marés são as que possuem efeitos diretos na degradação das estruturas de betão. Desta forma as correntes marítimas apresentam uma ação indireta influenciadora na concentração dos compostos químicos e na composição do material levado em suspensão, os quais poderão ter ação direta na erosão ou ataque químico das estruturas de betão (21).



Figura 31: Patologia provocada pela ação da maré em uma estrutura de betão (20).

Os danos por impacto em uma estrutura de betão podem variar entre a fragmentação superficial causada por um impacto leve a partir de uma embarcação “esbarrando” contra uma parede de bloqueio para a perda total de uma estrutura causada por uma colisão de um navio com uma ponte ou cais. Como a gama de danos causados por impacto pode ser tão grande, não é possível definir um conjunto típico de sintomas (AASHTO, 1991). No caso de um impacto catastrófico, o dano pode ser debaixo de água e, portanto, sem serem previamente detectados. Em tal caso, a estrutura sofre não só do resultado direto do impacto (em geral, fissuras e escamação), mas também a partir dos resultados indiretos do maior acesso ao interior do betão e aço de reforço pela água e contaminantes existentes na água (19).

Associado ao efeito das marés temos os efeitos causados pela abrasão que é normalmente causada por partículas existentes na água (rochas, areia ou cascalho), roçando ou com algum grau de impacto contra a superfície do betão. A abrasão subaquática pode incluir

danos às bacias de dissipação de estruturas hidráulicas ou danos nos cais e empilhamento de materiais, causado por partículas abrasivas sendo levadas pelas correntes. Os sistemas de resistência à abrasão, tais como em uma bacia ou “piscina”, normalmente produzem na sua superfície um desgaste ou uma superfície de betão polida, com os seus agregados muito expostos ou totalmente removidos. Abrasão por partículas pela água normalmente produz uma aparência semelhante à de betão projetado. Os danos provocados pela abrasão no betão são muito discutidos nos artigos ACI²⁹ 201.2R e ACI 210R. A abrasão também pode ser causada pelo movimento dos navios que atracam em estruturas bem protegidas. Novamente, os danos permitem um maior acesso ao interior do betão. Em climas frios, o gelo é um dos principais contribuintes de abrasão ⁽¹⁹⁾.

Como consequência da ação das marés, uma estrutura de betão exposta à ação da água do mar passa por ciclos de molhagem e de secagem (como ilustrado na figura 32), assim como de calor e de frio, o que acaba por acelerar todos os processos de degradação envolvidos. A variação das marés do oceano é geralmente pequena, quase sempre menor do que 1 m mas, e no entanto, próxima à costa essa variação pode chegar a mais de 5 m ⁽²¹⁾.

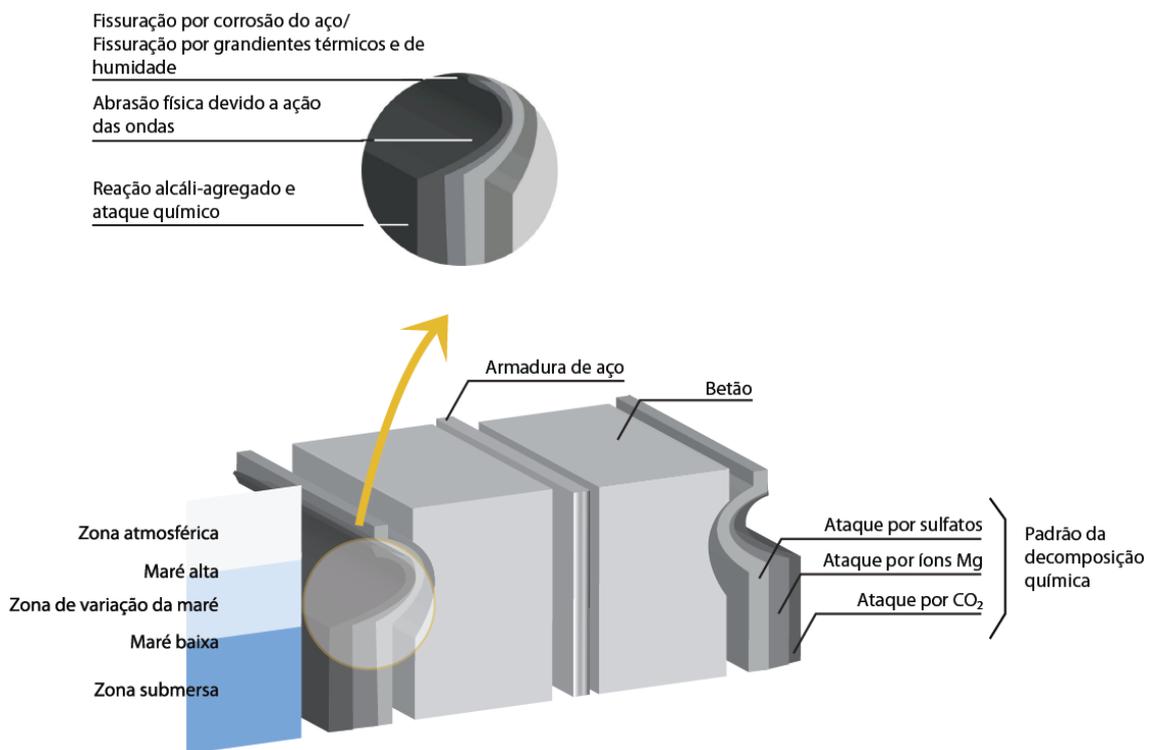


Figura 32: Representação esquemática da ação das marés nas estruturas de betão (adaptado).

As ondas irão atuar desta forma na degradação das estruturas de betão através do desgaste superficial provocado por seu impacto contínuo. A variação das marés irá afetar além da estrutura de betão exposta ao ar livre, a qual pode receber a água do mar diretamente ou apenas por respingos ou névoa, também as partes das estruturas que estão sujeitas às variações do nível do lençol freático³⁰, que possui características químicas bastante peculiares ⁽²¹⁾.

²⁹ American Concrete Institute.

³⁰ Lençol freático é o nome dado à superfície que delimita a zona de saturação da zona de aeração, abaixo da qual a água preenche todos os espaços porosos e permeáveis.

Para além do efeito das marés, o vento tem uma grande importância como agente de degradação, pois este irá atuar no transporte de iões, seja na forma de partículas sólidas ou através de gotas de solução salina, nos ciclos de molhagem e de secagem e, de maneira indireta, na formação de ondas e correntes. Além de agente de transporte do aerossol marinho, o vento age como um catalisador nos ciclos de molhagem e secagem das estruturas, favorecendo a precipitação ou formação de sais ⁽²¹⁾.

O vento também pode atuar como agente de desgaste físico através do transporte de partículas sólidas tais como grãos de areia que, ao colidirem com uma estrutura de betão, irá acelerar a sua degradação.

Outro dano físico, (já tratado em pormenor anteriormente), é a cavitação, que no caso particular do betão é causado pela implosão das bolhas de vapor transportadas em uma corrente de água fluindo rapidamente. As bolhas são formadas e, posteriormente, destruídas pela pressão e pelas condições que resultam da mudança de descontinuidades no caminho de fluxo ⁽¹⁹⁾.

A cavitação é um problema grave já que a força exercida sobre o betão, quando ocorre a implosão de bolhas, é grande o suficiente para remover o betão nesse local. A cavitação pode resultar em danos que vão desde a deterioração da superfície, à perda de betão em grandes túneis e condutas. Os danos provocados pela cavitação aparecem inicialmente como uma superfície muito áspera. Uma vez que o mecanismo que causa cavitação é autossustentável, uma vez iniciado o dano, tende a se desenvolver, piorando na direção do fluxo ⁽¹⁹⁾.

Um outro agente físico de degradação será os danos causados pelas cargas aplicadas à estrutura de betão, que podem ser danificadas por forças sísmicas ou cargas maiores do que aqueles para os quais foi concebido. Os sintomas típicos de tais danos estruturais são graves rachaduras em áreas de tensão ou de deformação e fragmentação em áreas de compressão, esses danos irão facilitar o acesso dos sais para o interior do betão ⁽¹⁹⁾.

•Agentes biológicos:

Desde os primórdios da terra, as características físico-químicas da água do mar são muito favoráveis para o desenvolvimento da vida, tendo sido o mar o berço da vida na terra. Os principais organismos agressores existentes nas estruturas de betão são os organismos incrustadores que se fixam nas estruturas e que causam danos diretos, através do desgaste da parte da estrutura onde se fixam, ou de forma indireta, através da produção de resíduos metabólicos³¹, enzimas e ácidos devido à sua ação metabólica ⁽²¹⁾.

Os organismos como os moluscos, crustáceos, equinodermos e algas, que são exemplos de incrustadores, afetam positiva e negativamente as estruturas de betão. Negativamente, pelo desgaste superficial ou aumento de peso das estruturas; positivamente, pelo fato de servirem de anteparo para as ondas, reduzindo, assim, a ação direta destas. Outro exemplo do efeito ambíguo é o das algas, dado que estas podem ser consideradas nocivas às estruturas quando observadas como formadoras de compostos sulfurosos, ácido carbónico e dióxido de carbono, por outro

³¹ Os resíduos metabólicos se referem às secreções celulares no meio externo, sendo que algumas dessas secreções metabólicas ainda podem ter importância funcional.

lado, as algas em zonas submersas podem selar a superfície das estruturas, melhorando assim a sua durabilidade pela proteção conferida ⁽²¹⁾.



Figura 33: Reparação de uma estrutura de betão no fundo do mar ^[21].

Sendo o ataque pela água do mar o fenómeno de degradação que mais afeta as estruturas de betão em todo o mundo, a sua reparação, nomeadamente sob a água, apresenta muitos problemas complexos. Embora os procedimentos de reparação e os materiais básicos sejam semelhantes às exigidas à superfície, as duras condições ambientais e os problemas específicos associados com o trabalho de baixo de água ou na área de zona de marés, podem causar muitas diferenças no procedimento de reparação ⁽¹⁹⁾.



Figura 34: Utilização da Jaqueta G, produzido pela Rogertec[®], que possui uma durabilidade média de 10 a 20 anos para a proteção contra a ação da água do mar no betão ^[22].

A reparação do betão sob a água é geralmente difícil, exigindo produtos e sistemas especializados, e os serviços de profissionais altamente qualificados e experientes. A avaliação adequada da situação atual da estrutura é o primeiro passo, essencial para a concepção de reparos de longo prazo. Para ser mais eficaz, a avaliação a longo prazo requer informações históricas sobre a estrutura e sobre o seu meio ambiente, incluindo quaisquer alterações, e os registros de inspeções periódicas nas instalações ou reparações anteriormente efetuados. A documentação detalhada da causa e o grau de deterioração, os critérios de projeto precisos, técnicas de reparação adequada e a garantia de qualidade dos procedimentos de instalação e reparação irão resultar num melhor sistema de reparo. A longevidade da reparação é o indicador final de sucesso ⁽¹⁹⁾.

A deterioração do betão em zonas de maré e respingo é um sério problema econômico. A água que contém oxigênio e contaminantes pode causar ataque agressivo no betão. A reparação do betão nessas zonas requer uma mão-de-obra especializada e altamente técnica, com tecnologia avançada para reparações nas estruturas de betão. Ela apresenta problemas de seleção de materiais de reparação e métodos adequados, e de manter o controle de qualidade, que não é normalmente associada com a reparação acima da água. Equipamentos, acabamento de qualidade e produtos e sistemas de alto desempenho são extremamente importantes. Reparções de sucesso podem ser alcançadas quando esses fatores são considerados com cuidado e adequadamente aplicados ⁽¹⁹⁾.

3.3 - Ataque por ácidos.

A durabilidade do betão está associada ao grau com o qual o mesmo sofre deterioração ou decomposição, em consequência dos ataques químicos aos quais será exposto. No caso do ataque ácido, esta é a consequência de dois fatores (Zivica e Bajza 2001) ⁽²³⁾:

- Alcalinidade do cimento;
- Presença de ácidos que entram em contato com as estruturas de betão.



Figura 35: As estruturas de betão destinadas aos esgotos são as mais vulneráveis aos ataques por ácidos ⁽²³⁾.

Deve entender-se que há uma diferença fundamental entre o ataque pelos sulfatos e pelos ácidos. No primeiro caso, há uma completa transformação do cimento endurecido, onde há a destruição do sistema de poros. Com o ataque dos ácidos, a permeabilidade do betão em boas condições é de menor importância. Com os outros tipos de ataque a seguir descritos, a permeabilidade do betão em boas condições é da máxima importância ⁽²³⁾.

A ação das águas moles ou ácidos no betão origina a lixiviação do hidróxido de cálcio da pasta de cimento ⁽¹¹⁾. O ataque ácido origina a decomposição dos produtos de hidratação, especialmente o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). A identificação precisa dos produtos de reação é essencial para o correto diagnóstico do principal processo de deterioração, sendo que esta identificação é geralmente executada por métodos microscópicos e/ou petrográficos ³² ⁽²³⁾. Regra geral, as ocorrências de reações químicas por ação dos ácidos originam a conversão do hidróxido de cálcio, silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio em sais de cálcio ⁽²⁴⁾.

Neste caso, se o sal de cálcio é solúvel, o grau de reação será determinado em grande parte pelo grau com que o sal de cálcio será dissolvido, sendo este um exemplo de uma importante condição que é válida, em geral, nas reações químicas deletérias. Mas é de se salientar que o grau de deterioração causado pelo ataque químico agressivo numa estrutura de betão é muito mais alto numa solução corrente (por exemplo, em tubos de esgotos feitos de betão), do que numa solução estagnada como, por exemplo, numa central de tratamento de águas residuais ⁽²⁴⁾.



Figura 36: Reparação de um reservatório de tratamento de águas residuais sujeito a ataque ácido ^[24].

Tal como já foi mencionado anteriormente neste trabalho, o betão é uma substância alcalina e muitos de seus constituintes podem facilmente reagir com ácidos. “O grau de reação dos diferentes ácidos no betão é determinado não tanto pela agressividade do ácido, mas pela solubilidade do sal de cálcio resultante. Quanto menos solúvel for o sal formado, mais forte será o efeito de passivação ³³ do sal precipitado” ⁽²⁴⁾. O resultado direto dessas reações, ou transformações no betão, é a perda da capacidade de coesão do betão endurecido, enfraquecendo assim as estruturas de betão (Zivica, Bajza, 2001).

³² A petrografia é um ramo da petrologia cujo objetivo é a descrição das rochas e a análise das suas características estruturais.

³³ Passivação é a modificação do potencial de um eletrodo no sentido de menor atividade (mais catódico ou mais nobre), devido a formação de uma película de produto de corrosão.

Os ácidos podem ter origem em fontes externas, como por exemplo, os solos em torno de uma estrutura de betão armado, as águas subterrâneas, as águas pluviais, esgotos, e de poluentes no ar (chuvas ácidas). Alguns agregados, incluindo os siliciosos (contendo sílica), não são atacados por ácidos, mas os agregados calcários (contendo cálcio), facilmente reagem com os ácidos. Os ácidos irão, assim, atacar a pasta e os agregados calcários da mesma forma, diluindo-se ao longo da estrutura e diminuindo os danos provocados na pasta cimentícia (Kosmatka, 2002) ⁽¹⁷⁾.

O pH das soluções ácidas, assim como de muitas outras soluções que entram em contato com o betão, são os fatores primários determinantes na intensidade do ataque ácido à estrutura de betão. Os ácidos são substâncias com um valor de pH inferior a 7 (numa escala de 0 a 14). Um pH de cerca de 6 provocará apenas danos superficiais na estrutura de betão e, em especial, em estruturas de betão mais esbeltas, tais como nas superfícies de espessura fina e altamente permeável (St. John, 1998). Para que um ataque ácido cause danos potencialmente graves, o ácido deverá ter um valor de $\text{pH} \leq 5$. A quantidade de ácido em contato com a estrutura irá determinar o grau e a intensidade da deterioração que ocorrerá (St. John, 1998) ⁽¹⁷⁾.

Os ácidos podem ter origem orgânica, isto é, podem ser originados pela atividade microbiológica em águas residuais ou na decomposição de plantas, ou inorgânicos (de origem mineral). Os ácidos também podem vir de produtos químicos não encontrados na natureza, neste caso, que têm origem na atividade industrial; por exemplo, o nitrato (NO_3) pode atingir altas concentrações no ar em determinadas zonas geográficas devido às ações do vento e à própria geografia do terreno. Cloretos de ambientes marinhos também podem ser encontrados na atmosfera (em zonas até centenas de km da costa marítima). Todos estes compostos podem combinar-se com água para formar partículas que caem na terra sob a forma de chuva ácida, neblina, neve ou poeira (Zivica, Bajza, 2001), causando danos nas estruturas de betão a longo prazo ⁽¹⁷⁾.

No caso específico do betão, este é um material alcalino, com pH acima de 12,5. Esse valor de pH é necessário para garantir a sua proteção e a dos seus constituintes, por exemplo as armaduras de aço. No entanto, este valor de pH torna o betão num material propenso a reagir com soluções ou compostos ácidos, daí que o valor de pH deva ser mantido bastante alto a fim de evitar que os fenômenos de corrosão ocorram. Uma baixa razão água/cimento aumentará a resistência do betão à deterioração provocada pelo ataque ácido, já que assim a baixa permeabilidade obtida irá ajudar na manutenção da solução ácida fora dos poros da estrutura de betão (Kosmatka, 2002) ⁽¹⁷⁾.

Outra forma de proteger as estruturas de betão dos ataques ácidos pode passar, por exemplo, pela utilização de adições minerais. As pastas de cimento com cinzas volantes³⁴ contêm menor quantidade de hidróxido de cálcio livre que as pastas de cimento Portland vulgar. Uma vez que o hidróxido de cálcio é especialmente vulnerável ao ataque de ácidos, a redução da sua quantidade no cimento aumentará a resistência da estrutura de betão aos ataques ácidos. Além disso, quando a cinza volante é adicionada ao cimento são criados poros menores e a

³⁴ Cinzas volantes é a designação dada ao material obtido pela precipitação eletrostática, ou captação mecânica em filtros de saco ou dispositivos semelhantes, das poeiras contidas no fumo produzido pela queima de combustível nas centrais termoelétricas a carvão.

pasta fica mais homogênea (De Belie, et al, 1997). A sílica de fumo e as escórias de alto-forno têm um efeito similar ⁽¹⁷⁾.

No entanto, para a determinação do tipo de ácido e extensão do dano na estrutura de betão, o diagnóstico é um elemento chave fundamental. A simples inspeção visual do betão não permite, em geral, verificar a corrosão da pasta de cimento que envolve o agregado e o mantém no lugar. O agregado pode ou não estar corroído, dependendo se é silicioso ou calcário. O conhecimento das condições ambientais do meio envolvente à estrutura ajudará no diagnóstico se aquela corrosão foi provocada ou não por um ácido. O exame microscópico/petrográfico ajudará a revelar os indícios de ataque ácido (St. John, 1998) ⁽¹⁷⁾.



Figura 37: Ataque provocado por derramamento de ácido de baterias de automóveis, numa oficina ^[25].

Em geral, a probabilidade de uma estrutura de betão ficar exposta à ação de um ácido é baixa. Isso, claro, com exceção daquelas cuja exposição esteja diretamente relacionada com atividades industriais. No entanto, todas as estruturas de betão expostas ao meio ambiente urbano ou industrial (ou mesmo as estruturas nas suas proximidades), estão sujeitas à ação das chuvas ácidas que, ao longo do tempo, podem trazer graves problemas às estruturas ao reagir com o betão.

Assim, se conclui que as ações dos ácidos sobre o betão resultam na destruição do sistema de poros do material, conduzindo à produção de uma transformação completa na pasta de cimento endurecida. Como resultado direto dessas ações, o betão perde massa devido à redução da sua seção. Esta perda acontece em camadas sucessivas, a partir da superfície exposta à ação do ácido, sendo a velocidade da degradação proporcional à quantidade e à concentração do ácido em contato com o betão.

Para a proteção das estruturas de betão contra este tipo de ataque em particular (e de ação muito frequente nas estruturas), o uso de cimento de alto-forno ou de pozolanas tem ajudado no aumento do desempenho do betão. A proteção eficaz contra este tipo de ataque, no entanto, depende mais das próprias qualidades do que propriamente do tipo de cimento usado.

Apesar dos vários ensaios (tanto físicos como químicos de resistência aos ácidos), que têm sido realizados e desenvolvidos ao longo dos anos, não existe até os dias de hoje um

procedimento padronizado para a proteção contra o ataque por ácidos, pois o valor de pH isoladamente não é um indicador adequado do potencial do ataque, e a própria presença de dióxido de carbono (CO_2), (que pode ser decorrente da dureza da água), também tem uma forte influência sobre a situação. Outros fatores, como a temperatura e a pressão, tendem a aumentar a intensidade do ataque.

Embora exista uma quantidade significativa de dados sobre os ataques por ácidos, nomeadamente sobre os ataques por ácido sulfúrico e resultantes da corrosão biogênicas do betão, pouco tem sido alcançado no caminho da formulação de um modelo matemático aceite para a deterioração que incorpore parâmetros de significância. Isso representa uma lacuna de conhecimento significativo e atua como uma barreira técnica para a utilização de materiais e de projeto como um meio de controle da corrosão devido ao ataque ácido (e também bioquímico). Isto continua a inibir principalmente os projetos de infraestruturas de águas residuais duráveis e tem implicações significativas para a despesa pública neste domínio. A necessidade de considerar a interação de processos biológicos e químicos pode ser a chave para conseguir um maior progresso e permitir usar os conhecimentos sobre a mistura do betão como um meio de atingir a vida útil prevista em projeto ⁽²⁵⁾.

3.3.1 - Ácidos inorgânicos.

Os ácidos inorgânicos são de origem mineral e dividem-se em hidrácidos, quando não apresentam oxigênio em sua combinação, e oxiácidos, quando esse átomo faz parte de sua estrutura. Para os ácidos inorgânicos em causa, a ação do ácido clorídrico conduz ao cloreto de cálcio, que é uma solução muito solúvel. O ácido sulfúrico dará origem ao sulfato de cálcio, que originará a precipitação do gesso. O ácido nítrico formará o nitrato de cálcio, que também é uma solução muito solúvel. Da mesma forma, outras reações similares ocorrem com os ácidos orgânicos que serão abordados mais à frente neste trabalho ⁽²⁴⁾.

O ácido clorídrico, nítrico, sulfúrico, clórico (encontrados em sais de clorato), e o crômico, são conhecidos por serem alguns dos ácidos inorgânicos mais perigosos para o betão (Zivica, Bajza, 2001). Estes ácidos, de origem mineral, quando atacam o cálcio existente na pasta de cimento originam a formação de sais de cálcio. Se a solubilidade destes sais é bastante baixa, uma de duas hipóteses pode ocorrer.

A primeira possibilidade é que os sais formem uma camada protetora na superfície impedindo a continuação do ataque ácido. A outra possibilidade é que, por exemplo, sob o ataque de ácido sulfúrico, esses sais formem produtos expansivos, como a etringite e o gesso. Isso irá aumentar o dano causado pelo ácido, além de originar fendas e a delaminação devido à expansão (Zivica, Bajza, 2001). Tal como já referido, alguns ligantes pozolânicos têm um efeito benéfico na mitigação deste tipo de ataque. As cinzas volantes e a sílica de fumo, por exemplo, têm demonstrado serem eficazes na resistência à corrosão por ácidos (De Belie, et al, 1997; Pavlik, Uncik, 1997).



Figura 38: Graves danos em um coletor de esgotos provocada por ataques ácidos no betão [26].

A título de exemplo, em 1945, C.D. Parker³⁵ descreveu um ataque com ácido sulfúrico em redes de esgotos de betão como “a produção de depósitos de massa branca, húmidos, esquisitos e facilmente removidos da sua superfície” (25).

O sulfato de cálcio (gesso), formado foi resultado de uma reação entre os produtos de hidratação na matriz do cimento e do ácido sulfúrico³⁶. Experiências e análises *in-situ* da argamassa de cimento e do betão confirmaram que a formação de gesso é um dos principais mecanismos de corrosão envolvidos na deterioração da matriz de cimento, levando a uma perda de coesão dos compostos cimentícios de cálcio³⁷. A degradação das fundações de betão de um prédio na Itália, que tinha sido exposto às águas de esgoto foi atribuída ao crescimento de cristais de gesso na interface pasta-agregado causando uma perda de resistência³⁷ (25).

A acumulação de gesso pode atuar como uma barreira à penetração³⁸, porém também foi alegado que a área de superfície mais áspera leva a uma maior área de superfície a ser atacada³⁹. Em experiências laboratoriais para avaliar as tubulações de betão disponíveis comercialmente, De Belie et al.⁴⁰, testaram tubulações de betão elaborados com cimentos CEM I e CEM III, cimento de alta resistência aos sulfatos, que foram expostos a uma solução de ácido

³⁵Parker CD. The isolation of a species of bacterium associated with the corrosion of concrete exposed to atmospheres containing hydrogen sulfide. Aust J Exp Biol Med Sci 1945;23:81–90 e Parker CD. The function of *Thiobacillus concretivorus* (nov. spec.) in the corrosion of concrete exposed to atmospheres containing hydrogen sulfide. Aust J Exp Biol Med Sci 1945;23:91–8.

³⁶Skalny J, Marchand J, Odler I. Sulfate attack on concrete. London: Spon Press; 2002.

³⁷Mori T, Nonaka T, Tazaki K, Koga M, Hikosaka Y, Noda S. Interactions of nutrients, moisture and pH on microbial corrosion of concrete sewer pipes. Water Res 1992;26(1):29–37, Davis JL, Nica D, Shields K, Roberts DJ. Analysis of concrete from corroded sewer pipe. Int Biodeter Biodegr 1998;42(1):75–84, Hewayde E, Nehdi M, Allouche E, Nakhla G. Effect of geopolymer cement on microstructure, compressive strength and sulfuric acid resistance of concrete. Mag Concr Res 2006;58(5):321–31 e Gollop RS, Taylor HFW. Microstructural and microanalytical studies of sulfate attack. IV. Reactions of a slag cement paste with sodium and magnesium sulfate solutions. Cem Concr Res 1996;26(7):1013–28.

³⁸Rendell F, Jaubertie R. The deterioration of mortar in sulphate environments. Constr Build Mater 1999;13(6):321–7 e Monteny J, Vincke E, Beeldens A, De Belie N, Taerwe L, Van Gemert D, et al. Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. Cem Concr Res 2000;30(4):623–34.

³⁹Vollertsen J, Nielsen AH, Jensen HS, Wium-Andersen T, Hvitved-Jacobsen T. Corrosion of concrete sewers – the kinetics of hydrogen sulfide oxidation. Sci Total Environ 2008;394(1):162–70.

⁴⁰De Belie N, Monteny J, Beeldens A, Vincke E, Van Gemert D, Verstraete W. Experimental research and prediction of the effect of chemical and biogenic sulfuric acid on different types of commercially produced concrete sewer pipes. Cem Concr Res 2004;34(12):2223–36.

sulfúrico (H_2SO_4) a 0,5% em ciclos alternados de molhagem e secagem. Concluíram que o agregado calcário (que agiu como um elemento de sacrifício para reduzir a taxa de ataque ácido) desempenhou um papel mais crucial contra o ataque que o tipo de cimento escolhido ⁽²⁵⁾.

Os cimentos resistentes aos sulfatos também tiveram melhor desempenho que os cimentos de escória de alto-forno, uma observação semelhante apoiada por outros resultados experimentais⁴¹ (provetes de betão contendo 60% de escórias granuladas de alto forno (GGBS) em H_2SO_4 a 1% para 168 dias). Esta conclusão é, contudo, contrariada pela investigação de Monteny et al.⁴², em experiências com 1-5% de soluções de H_2SO_4 . No entanto é de salientar a importância do papel desempenhado pelo agregado calcário⁴³ ⁽²⁵⁾.

Um composto comum no ataque por ácidos inorgânicos, e que surge pela ação do ácido sulfúrico, é a etringite, que é um composto cristalino. Este composto é classificado de etringite primária quando a sua formação é decorrente do processo de hidratação normal do cimento, e de etringite secundária quando é originada por um ataque externo de sulfatos. Algumas das reações associadas à sua formação envolvem os aluminatos de cálcio, tais como aluminato tricálcico (C_3A), e o gesso⁴⁴ ⁽²⁵⁾.

De acordo com a Skalny et al.⁴⁵ sob o ataque de ácido sulfúrico apenas quantidades limitadas de etringite se formarão nos pontos mais profundos do betão, desde que o pH seja alto o suficiente para manter sua estabilidade e que grande parte do gesso formado nos estágios iniciais do ataque possa passar para o betão. Essa avaliação coincide com outros pesquisadores que também declararam a incapacidade da etringite para “sobreviver” em um ambiente ácido⁴⁶ e, mesmo em ambientes com pH alcalino da ordem dos 10,6⁴⁷ ⁽²⁵⁾.

Em contraste, Monteny et al.⁴⁴, atribuíram grande importância nas suas avaliações ao devastador efeito sobre o betão causada pela etringite do que o causado pelo gesso. Enquanto a sua formação a partir de um ataque por ácido sulfúrico, também foi documentada por outros pesquisadores, a avaliação da influência de fungos na corrosão do betão⁴⁸ e do ácido sulfúrico biogênico, como causadores da corrosão ácida⁴⁹ ⁽²⁵⁾.

Importa ressaltar que a presença de gesso e etringite é aceite como sendo função do tipo de cimento e da dosagem de ligante utilizado. No entanto, o controle da presença desses compostos expansivos não se encontra ainda bem desenvolvido ⁽²⁵⁾.

⁴¹ Osborne GJ. Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete. *Cem Concr Compos* 1999;21(1):11–21.

⁴² Monteny J, Vincke E, Beeldens A, De Belie N, Taerwe L, Van Gemert D, et al. Chemical, microbiological, and in situ methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. *Cem Concr Res* 2000;30(4):623–34.

⁴³ Building Research Establishment. BRE special digest 1, concrete in aggressive ground: part 1: assessing the aggressive chemical environment, 2nd ed.; 2003 e Osborne GJ. Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete. *Cem Concr Compos* 1999;21(1):11–21.

⁴⁴ Monteny J, Vincke E, Beeldens A, De Belie N, Taerwe L, Van Gemert D, et al. Chemical, microbiological, and in situ methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. *Cem Concr Res* 2000;30(4):623–34 e Building Research Establishment. BRE special digest 1, concrete in aggressive ground: part 1: assessing the aggressive chemical environment, 2nd ed.; 2003 e Osborne GJ. Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete. *Cem Concr Compos* 1999;21(1):11–21.

⁴⁵ Skalny J, Marchand J, Odler I. Sulfate attack on concrete. London: Spon Press; 2002.

⁴⁶ Thomson G. Corrosion and rehabilitation of concrete access/inspection chambers. In: Proceedings of 63rd annual water industry engineers and operators' conference. Brauer College, Warrnambool, Australia; 2000. p. 28–35.

⁴⁷ Allahverdi A, Skvara F. Acidic corrosion of hydrated cement based materials. Part 2 – kinetics of the phenomenon and mathematical models. *Ceram–Silikáty* 2000;44(4):152–60.

⁴⁸ Tazawa EI, Morinaga T, Kawai K. Deterioration of concrete derived from metabolites of microorganisms. In: Proceedings 3rd CANMET/ACI international conference durability of concrete. American Concrete Institute. Nice, France; 1994. p. 1087–97.

⁴⁹ Allahverdi A, Skvara F. Acidic corrosion of hydrated cement based materials. Part 2 – kinetics of the phenomenon and mathematical models. *Ceram–Silikáty* 2000;44(4):152–60.

3.3.2 - Ácidos orgânicos.

Os ácidos orgânicos são compostos que contêm na sua estrutura o grupo carboxilo (-RCOOH). Entre os milhares de ácidos orgânicos conhecidos alguns são de enorme importância para o homem (ex:aminoácidos). Os ácidos orgânicos são provenientes de águas residuais ou da compostagem de plantas e resíduos vegetais. Esses ácidos são geralmente um problema muito sério em silos de cereais ou de instalações de armazenamento de frutas/vegetais, instalações pecuárias e centrais de tratamento de águas residuais. Em geral, a agressividade dos ácidos orgânicos aumenta com a solubilidade dos seus sais de cálcio (Zivica, Bajza, 2001).



Figura 39: Tubos de betão para redes de esgotos plastificados internamente para proteção contra ataques químicos por ácidos orgânicos [27].

Os pisos de betão de explorações pecuárias, para além dos ataques ácidos oriundos dos dejetos dos animais, são atacados por ácidos láctico e acético, que são produzidos a partir de misturas de farinhas/rações com a água derramada no chão. Esses ácidos combinam-se com a portlandite existente produzindo sais de cálcio altamente solúveis, acabando por entrar na estrutura porosa do betão diminuindo o pH e permitindo que a corrosão da pasta ocorra. Este processo, juntamente com a ação dos cascos dos animais sobre o betão enfraquecido, aumenta os danos provocados (De Belie, et al, 1997).

Contudo, testes químicos, isoladamente, não representam totalmente os efeitos da ação microbiana no betão, embora possam ajudar a avaliar os tipos de danos que podem ocorrer. Alguns pesquisadores têm realizado análises laboratoriais em escala real, mas os métodos para simular as condições *in situ* são sempre complicados⁵⁰ (25).

Os custos associados à exploração e manutenção de infraestruturas de águas residuais são muito elevados em todoo mundo. Os custos de manutenção desproporcionada mente elevados indicam a falta de durabilidade adequada. Ainda continua a existir uma falta de consenso sobre os mecanismos de degradação, o desempenho de vários tipos de cimento, o papel das bactérias no processo de corrosão associados às águas residuais e metodologias de teste (25).

⁵⁰ Monteny J, Vincke E, Beeldens A, De Belie N, Taerwe L, Van Gemert D, et al. Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. *Cem Concr Res* 2000;30(4):623–34 e De Muynck W, De Belie N, Verstraete W. Effectiveness of admixtures, surface treatments and antimicrobial compounds against biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. *Cem Concr Compos* 2009;31(3):163–70.

Um passo fundamental no avanço da compreensão da deterioração associada a este mecanismo é uma abordagem combinada, que considera a interação entre processos biológicos e químicos. Se isso puder ser conseguido, poderão ser tomadas medidas para estabelecer uma abordagem baseada no desempenho do betão nessas condições de serviço severo ⁽²⁵⁾.

3.4 - Ataque por sulfatos.

O ataque por sulfatos no betão tem sido relatado como a causa de danos no betão por mais de um século. No entanto, o termo "ataque por sulfatos" tem sido utilizado na literatura para descrever pelo menos seis tipos de reações, apenas um ou dois dos quais são os mecanismos clássicos de ataques por sulfatos que, especificamente, envolvem o ião sulfato atuando quimicamente ⁽²⁶⁾. As reações envolvidas nos ataques por sulfatos foram revistas por Cohen e Bentur⁵¹. O ataque por soluções de sulfato produz efeitos diversos, e os mecanismos associados podem ser um pouco esclarecidos ao isolar esses efeitos e estudar cada um deles em pormenor. Deve ser entendido que as combinações de dois ou mais efeitos podem produzir complicações, o que não pode ser plenamente compreendido usando os resultados dos testes individuais ⁽²⁷⁾.



Figura 40: Ataque por sulfatos com consequente corrosão da armadura ^[28].

O ataque por sulfatos pode ser simplesmente definido como uma série de reações químicas entre os componentes do betão já endurecido e os iões sulfato. Geralmente é a pasta de cimento que é atacada. Os iões sulfato podem ter origem interna (nos próprios constituintes) ou externa (solos, poluição industrial, água e atmosfera). O ataque por sulfatos está em geral conotado com o ataque externo, enquanto o interno está englobado nas reações expansivas de origem interna. O ataque por sulfatos pode ser inibido ou totalmente evitado usando uma composição adequada e com a devida proteção contra a ação externa ⁽¹⁷⁾. Estas reações entre os

⁵¹ M.D. Cohen, A. Bentur, Durability of Portland cement-silica fume pastes in magnesium sulfate and sodium sulfate solutions, ACI Mater. J. 85-M3 (1988) 148-157.

íons sulfato e os compostos da pasta de cimento geralmente resultam na expansão do betão, na perda da sua resistência devido à degradação química, e na formação de fissuras e fendas. Visivelmente, pode-se observar delaminação, fragmentação, fissuração, e por vezes perda de coesão (Kosmatka, 2002).

Os íons de sulfato (SO_4^{2-}) combinam-se com outros íons para formar os vários reagentes que intervêm no ataque por sulfatos. Por exemplo, o sulfato de cálcio (CaSO_4), sulfato de sódio (Na_2SO_4) e o sulfato de magnésio (MgSO_4), são algumas das formas que atacam a pasta de cimento do betão ao reagirem com os seus compostos hidratados, como os aluminatos de cálcio, monosulfoaluminato e silicato de cálcio (Colleparidi; Kosmatka, 2002). Os produtos resultantes destas reações originam expansão com perda de coesão da pasta de cimento e na resistência do betão (17). Os sinais visíveis de um ataque por sulfatos podem incluir (17):

- Fragmentação;
- Delaminação;
- Macrofissuração;
- Perda de coesão;
- Dissolução da pasta de cimento.



Figura 41: Danos na calçada de betão em contato direto com o solo, Palácio da Alvorada, Brasília, Brasil.

As zonas mais vulneráveis de uma estrutura de betão a este tipo de ataque são as que estão imediatamente acima ou abaixo do solo. Se existirem fontes de sulfato no ambiente em redor da estrutura, tais como solos ricos em sulfatos ou água salgada, juntamente com os danos anteriormente descritos, há uma forte hipótese de o ataque em causa ter sido provocado por ação dos sulfatos. As patologias mais comuns no ataque por sulfatos são a esfoliação da superfície do betão, a deterioração da pasta de cimento e o surgimento de depósitos salinos à superfície do betão (St. John, 1998) (17).

Para além de uma inspeção visual da estrutura de betão e do seu ambiente, o estudo microestrutural de uma amostra de betão pode revelar sinais de ataque de sulfatos,

nomeadamente pela presença de etringite⁵², gesso, taumasite⁵³ e brucite⁵⁴. O uso da difração de raios X e da microscopia eletrônica de varrimento pode ajudar a revelar a possível presença de etringite no nível subatômico (St. John, 1998) (17).

É óbvio que se as soluções de sulfato de sódio e sulfato de magnésio entrarem em contato com o betão, problemas relacionados aos ataques por sulfatos (e relacionados ao tipo de cimento), podem ocorrer. Tudo isto foi dramaticamente revelado pelos resultados obtidos em 2009 pela Portland Cement Association e Construction Technology Laboratories affiliate⁵⁵ durante os seus estudos em diversas amostras (26).

Estruturas de betão expostas a soluções de sódio e sulfato de magnésio sofreram graves danos, depois de muitos anos, mas, durante a remoção das partes abaixo do solo, e que estavam diretamente em contato com os sulfatos, verificou-se que eles pareciam não ter sido danificados.

Amostras de betão completamente imersas em soluções com 10% de sais, não evidenciaram danos. A conclusão (mas talvez prematura), é que o ataque por sulfatos não causaram danos, mas processos ligados à imersão nessas soluções, tais como a cristalização de sais, já causaram danos no betão. Para complicar a análise feita anteriormente, muitos solos contêm ácido sulfúrico, devido à oxidação de sulfuretos de ferro (pirite ou marcassite). O ataque ácido também pode ocorrer e os danos causados pelo ácido podem mascarar outros ataques, como é o caso dos ataques por sulfatos⁵⁶, especialmente porque o gesso é o principal produto dessa reação (26).

Para prever o tempo de vida útil das estruturas de betão expostas aos sulfatos, deve-se saber quais os catiões (por exemplo, sódio, magnésio, hidrogênio ou de cálcio) que acompanham os sulfatos. Para prever com exatidão os danos devido ao gesso existente no solo, recorre-se ao uso de métodos empregando, por exemplo, sulfato de sódio, para assim se conseguir fazer uma previsão. A previsão da deterioração abaixo do solo deve ser feita com base em estudos onde a evaporação, pode ser o mecanismo de condução. Além disso, a localização dos reagentes e produtos é importante (por exemplo, etringita secundária nos poros do betão não é nenhuma indicação de perigo, tal como se demonstrará mais à frente neste trabalho), e fatores como a carbonatação e exposição à humidade podem afetar significativamente a expansão devida à etringite ou ao hidróxido de magnésio (26).

Em contraste com o ataque pelos ácidos, em que o sistema de poros da estrutura de betão é completamente destruída, o ataque dos sulfatos resulta somente da interação do ião sulfato com certos componentes do cimento hidratado (24).

Em termos do tipo de processo, o ataque por sulfatos pode considerar-se (17):

⁵² A etringite é um mineral de fórmula $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ de cor branca a incolor. Quando formada no betão endurecido provoca a expansão e aumento do volume do betão, originando a fissuração do material.

⁵³ Taumasite é um mineral com fórmula química $\text{Ca}_3\text{Si}(\text{OH})_6(\text{CO}_3)(\text{SO}_4)\cdot 12\text{H}_2\text{O}$. Possui cor incolor a branca, ocorrendo na forma prismática em cristais hexagonais ou na forma acircular em grupos radiais.

⁵⁴ Brucite é um mineral constituído de hidróxido de magnésio, com fórmula química $\text{Mg}(\text{OH})_2$. O mineral geralmente é encontrado em associação com serpentina, calcite, aragonite, dolomite, magnesite, hidromagnesite, artinite, talco e crisótilo.

⁵⁵ D. Stark, Durability of concrete in sulfate-rich soils, Portland Cement Association, Research and Development Bulletin RD097, Skokie, IL 1989.

⁵⁶ F.A. Lossing, Sulfate attack on concrete pavements in Mississippi, in: Symposium on Effects of Aggressive Fluids on Concrete, Highway Research Record No. 113, 1966, pp 88–102.

- CH = Hidróxido de cálcio.

Estas reações, em presença de água em quantidade suficiente, causarão a expansão do betão, levando à sua fendilhação com um desenho irregular, facilitando ainda mais o acesso, ou a penetração, de elementos agressivos para o seu interior até a sua completa desintegração.

Até agora ainda não se encontrou uma simples explicação sobre a razão porque a combinação do sulfato e do aluminato tricálcico conduz à expansão do betão. No entanto, e de forma generalizada, os principais parâmetros que influenciam a expansão do betão, são ⁽²⁴⁾:

- Condições de exposição, ou seja, a severidade do ataque depende da quantidade de substância agressiva em contato com a estrutura de betão;
- Acessibilidade, isto é, permeabilidade do betão (grau de transporte);
- Susceptibilidade do betão, isto é, tipo de cimento (quantidade de substâncias reativas);
- Quantidade de água disponível.



Figura 42: Pormenor dos danos na calçada de betão em contato direto com o solo, Palácio da Alvorada, Brasília, Brasil.

O betão pode e deve ser protegido contra o ataque por sulfatos. No caso do ataque interno (que será aprofundado no capítulo 3.9 - “Reações expansivas internas”), este pode ser evitado através duma seleção criteriosa dos constituintes (agregados, cimento e aditivos). Igualmente importante, é a razão água/cimento ser mantida tão baixa quanto possível (cerca de 0,4), uma vez que uma razão mais elevada originará uma estrutura porosa mais aberta, tornando mais fácil a mobilidade dos iões sulfato no betão ⁽¹⁷⁾.

Para evitar o ataque externo por sulfatos, é fundamental conhecer o tipo de solo e de água de contato do local onde o betão irá ser colocado. Se o ambiente contém um nível elevado de compostos de sulfato, a composição de betão deverá possuir aditivos e uma adequada

razão água/cimento. Em situações de muita severidade também poderão ser usados cimentos resistentes aos sulfatos, como o ASTM⁵⁷ tipo V (Neville, 2004) (17).

O betão pode então ser protegido contra o ataque por sulfatos, seja escolhendo o tipo de ligante, quer assegurando um grau suficiente de impermeabilidade para impedir a entrada do ião sulfato nos poros do betão (24).

O ataque por sulfatos pode-se resumir à reação dos sulfatos com o aluminato tri cálcico hidratado (sendo este um constituinte normalmente encontrado no betão), dando assim origem ao sulfoaluminato hidratado (etringite ou sal de Candlot), taumasite e gesso. Tal como já foi referido anteriormente, esta reação ocorre com um expressivo aumento do volume, dando assim origem à fissuração e à delaminação do betão.

Embora a generalidade dos ataques por sulfatos ocorram em ambiente marinho podem, no entanto, ainda ocorrer por ação da combustão de resíduos na presença de água, ou em todos os locais onde as soluções de sulfato, cujas concentrações sejam superiores a 0,1%, entrem em contato com o betão endurecido.

A investigação dos ataques por sulfatos está em um “estágio crítico”. Apesar dos avanços significativos nos últimos anos, este problema ainda não é bem compreendido na sua generalidade. Devido ao seu complicado mecanismo, a reação entre os produtos de hidratação do cimento e as soluções de sulfato manifestam-se de diversas maneiras. A fim de proporcionar meios adequados para a seleção de materiais para o betão que são expostos a tais ambientes agressivos, pesquisas adicionais são necessárias para esclarecer a interação entre o betão e os sulfatos. Especificamente, o papel do catião na solução de sulfato, e os efeitos da formação de vários produtos como gesso, etringite e taumasite (27).

Sobre a extensão dos danos, esse aspeto ainda precisa ser investigado. Os métodos de testes disponíveis para o ataque por sulfato têm sido objeto de algumas críticas. Embora estes métodos de ensaio possam dar uma indicação dos mecanismos envolvidos no ataque por sulfatos, a previsão do desempenho em condições reais a partir de estudos laboratoriais está longe de ser consensual (27).

São necessários esforços para introduzir alterações adequadas nos ensaios, a fim de obter condições de exposição em laboratório que traduzam o que ocorre em campo. Avanços recentes nas técnicas de ensaios não destrutivos podem ser aplicadas à tarefa de monitorização de estruturas de betão, embora haja um significativo esforço necessário para calibrar esses métodos para os cenários de ataque por sulfatos. A fim de produzir modelos eficientes de betão para a utilização em ambientes agressivos, é imperativo desenvolver modelos de confiança. Os modelos podem ajudar na escolha do material adequado e as suas proporções, bem como na determinação de parâmetros de vida útil. Um primeiro passo para a modelação, é a definição dos parâmetros críticos indicadores da deterioração (27).

⁵⁷ASTM International (ASTM), originalmente conhecida como American Society for Testing and Materials, é um órgão Americano de normalização. A ASTM desenvolve e publicam normas técnicas para uma ampla gama de materiais, produtos, sistemas e serviços. A sede da organização está em West Conshohocken, Pensilvânia, cerca de 5 milhas (8 km) a noroeste de Filadélfia.

3.5 - Ataque por nitratos.

Os nitratos são sais formados a partir do ácido nítrico (HNO_3). Estes sais são facilmente solúveis em água e estão confinados quase que exclusivamente em formações geológicas relativamente recentes, geradas em desertos quentes. Eles são formados em solos por reações de oxidação normalmente associada à ação de nitro bactérias, podendo-se formar ainda pela ação de descargas elétricas, especialmente nos níveis mais elevados do solo. Os nitratos mais importantes são de sódio e potássio, sendo de menor importância os nitratos alcalino-terrosos (Ca, Mg e Ba) ⁽²⁸⁾.

As concentrações de meios agressivos afetam a corrosão do betão mais significativamente do que a corrosão química pura. Em ensaios realizados em betões, e com a aplicação de uma carga de 30% da carga total suportada, soluções muito concentradas de nitrato de amónio levaram a uma redução muito rápida da resistência, quer para o betão comum como para o betão de alta resistência ⁽²⁹⁾.

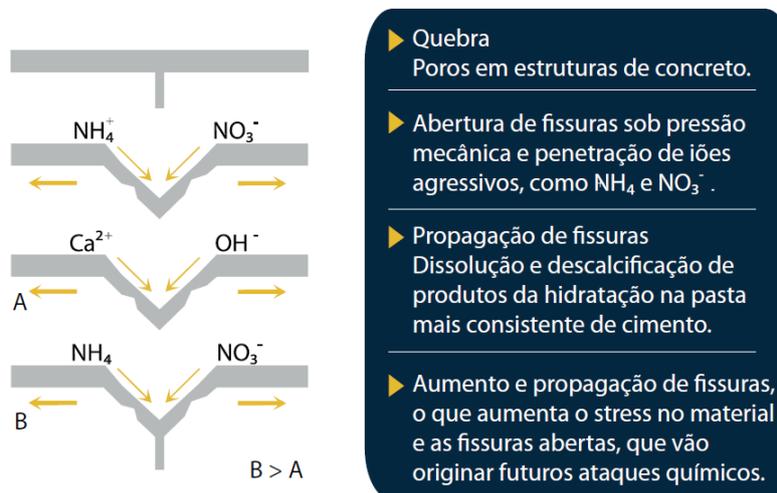


Figura 43: Degradação de materiais de base cimentícia por ação do nitrato de amónio (adaptado) ⁽²⁹⁾.

O ataque por nitratos ao betão, (nomeadamente o nitrato de amónio) tal como descrito anteriormente, consiste na ação ou ataque do ácido nítrico, através dos poros do betão, visto ser muito solúvel em água. No entanto, de entre os nitratos o ataque pelo nitrato de amónio é de longe o que se destaca pela severidade do ataque em si e pelos danos resultantes nas estruturas de betão. De referir, que muitos dos produtos químicos fabricados para utilização como adubos ou utilizados no processo de fabricação são agressivos ao betão, nomeadamente por incluírem na sua composição nitrato de amónio ⁽³⁰⁾.

O nitrato de amónio ataca frequentemente as estruturas industriais em que esses produtos são produzidos ou armazenados, ou onde a combinação de produtos pode dar origem ao nitrato de amónio. Os solos de antigos campos agrícolas, utilizados para a construção de empreendimentos habitacionais ou comerciais, onde os nitratos foram utilizados para aumentar a fertilidade do solo, também têm-se revelado muito propensos ao ataque por nitratos, uma vez que se encontram “contaminados”.



Figura 44: Construção de uma torre-silo numa fábrica de Fertilizantes nos EUA (1996) ^[30].

O nitrato de amónio ataca em especial os produtos de hidratação do cimento. No caso dos silos de betão para armazenamento de adubos à base de nitrato de amónio, são frequentes e graves as deteriorações na sua base, paredes e particularmente no telhado. O nitrato de amónio ataca o hidróxido de cálcio da pasta de cimento para formar nitrato de cálcio, que ocupa um volume maior, causando a expansão geral e conseqüentemente a desintegração do betão. Os sais de amónio parecem atuar também como trocadores de catiões, transformando o cálcio insolúvel em sais de cálcio facilmente solúveis, que são posteriormente lixiviados. Em termos da agressividade, os valores de concentração do ião amónio são os seguintes ⁽³⁰⁾:

- 15-30 mg/l, pouco agressivo;
- 30-60 mg/l muito agressiva;
- Acima de 60 mg/l altamente agressivos.

É comum na indústria de adubos a proteção do interior dos silos de betão através da utilização de revestimento de pintura, tipo epóxi⁵⁸, ou com revestimento de betão modificado com polímeros. A proteção com revestimentos asfálticos e de azulejo tem sido também usada embora menos do que as outras. Em termos de reparação, têm sido usados também revestimentos à base de fibra de vidro, aço inoxidável ou de alumínio. Para além daqueles métodos, têm-se usado betões de baixa permeabilidade. Por exemplo, no Reino Unido, foi utilizado betão projetado com 10-15% de sílica de fumo⁽³⁰⁾.

No caso do ataque por nitrato de amónio, as seções danificadas devem ser totalmente removidas para se efetuar a reparação. Desta forma, assegura-se que o material de reparação possa aderir, para que o processo seja eficaz. No entanto, importa referir, que os revestimentos por pintura ou as argamassas modificadas de base cimentícia não têm demonstrado serem muito eficazes a longo prazo ⁽³⁰⁾.

No entanto, a corrosão pode ter um efeito simultâneo, ou seja, pela combinação de um ambiente corrosivo e pelo stress mecânico na estrutura. Num ensaio realizado nos EUA, a

⁵⁸ Uma resina epóxi ou poliepóxido é um plástico termo-fixado que se endurece quando se mistura com um agente catalisador ou "endurecedor".

resistência dum betão HPC C80 imerso numa solução saturada de hidróxido de cálcio, sujeito ou não a 30% da carga inicial (com resistência inicial de seis meses a quando da realização do teste), observou-se os mesmos valores, para a resistência à flexão ou resistência à compressão. A resistência do betão HPC C80 armazenado em água aumentou continuamente durante dois anos. Já em solução de nitrato de amónio, a resistência do HPC C80 diminuiu. Após 28 dias de imersão, a resistência do HPC80 foi reduzida em cerca de 25%. Depois da imersão em 3 meses, as resistências diminuíram para metade da resistência inicial. Com aplicação de carga no betão, verificou-se uma aceleração significativa da taxa de deterioração. O HPC C80 na solução de nitrato de amónio (NH_4NO_3) a 10% (com um nível de carga de 30% da sua força inicial), perdeu 80% da sua resistência em 112 dias ⁽²⁹⁾.

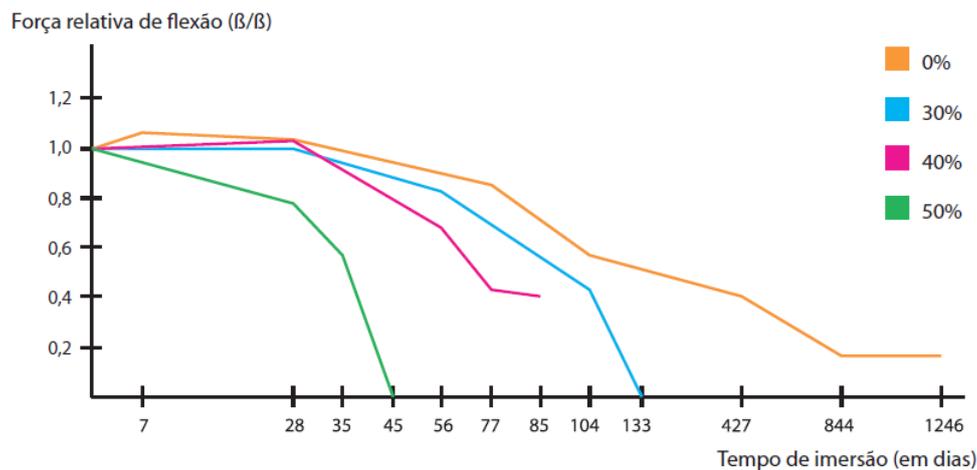


Figura 45: Resistência à flexão dum betão C40 imerso numa solução com 5% de NH_4NO_3 , sob diferentes tensões (adaptado) ⁽²⁹⁾.

Pode-se concluir que, quanto maior o nível de carga, maior é a redução da resistência. A resistência à flexão do betão C40 imerso em 5% de solução de NH_4NO_3 sob a ação de uma carga de 30% (da resistência máxima do betão sem estar imerso na solução de NH_4NO_3), a resistência foi de 40% em 85 dias, enquanto que, sob uma carga de 40%, em 60 dias a resistência foi de 50% em apenas 32 dias (fig. 45). Foi notável que as amostras submetidas ao ensaio de carga e corrosão cederam após certo período de imersão. O tempo de cedência depende do tipo de betão empregue, da concentração e dos meios agressivos em relação ao nível de carga aplicados ⁽²⁹⁾.

O efeito sinérgico da aplicação de uma carga durante a exposição aos nitratos aumenta a agressão e acelera a deterioração provocada, levando à perda de resistência do betão. Os efeitos da corrosão em betões imersos em soluções de nitrato de amónio dependem da concentração das soluções, da qualidade dos betões e dos níveis de carga da tensão aplicada externamente, ou seja, uma alta resistência do betão, baixos níveis de carga e de concentração da solução agressiva, levam a uma maior resistência contra os ataques por nitratos, minimizando a corrosão e prolongando a vida do betão ⁽²⁹⁾.

O tempo de vida dos betões diminui significativamente com o aumento da concentração da solução de nitrato de amónio, com ou sem carga. A maior concentração das soluções levou a uma profunda penetração dos iões agressivos após um certo período de imersão. A relação entre profundidade de ingresso e o tempo de imersão pode ser descrita por uma lei de raiz simples ⁽²⁹⁾.

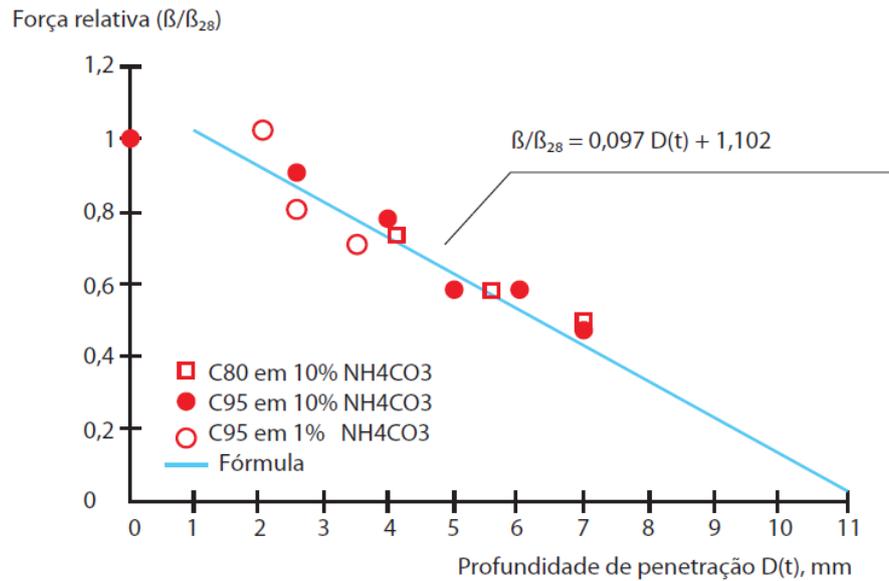


Figura 46: Relação entre a força relativa e a profundidade de penetração para betões imersos em soluções de 10% de NH_4NO_3 (adaptado)⁽²⁹⁾.

A força relativa à flexão β/β_0 foi quase proporcional a profundidade de penetração $C(t)$ em milímetros (fig. 46). A relação é independente da resistência inicial do betão e da concentração das soluções agressivas ⁽²⁹⁾.

3.6 - Ataque por sais de magnésio.

O magnésio é um elemento comum no solo e nas águas subterrâneas. Regra geral, o ião magnésio é perigoso para o betão quando presente em altas concentrações para além de estar associado a outros agentes químicos, como o anião sulfato. Estudos laboratoriais revelaram que betões feitos com alguns tipos de cimentos Portland são atacados em maior grau com altas concentrações de sulfato de magnésio (MgSO_4) do que por concentrações equivalentes de sulfato de sódio. Por consequência direta deste efeito, as recomendações para a especificação do betão têm feito a diferenciação entre as concentrações baixas e elevadas de magnésio, quando combinado com altas concentrações de ião sulfato ⁽³¹⁾.

Na prática, elevadas concentrações de ião magnésio encontram-se em solos onde tenham estado indústrias ou que tenham contido resíduos industriais. À exceção do cloreto de magnésio (MgCl_2), que é especialmente agressivo ⁽³¹⁾, o ião magnésio não é, em geral, muito agressivo, pois as ações do seu ataque atuam durante um longo período de tempo. A ação do ião magnésio no betão é complexa, mas, no entanto, um dos mecanismos chave é a substituição do ião cálcio (Ca^{2+}) nos silicatos de cálcio hidratados, que formam grande parte da pasta de cimento, por ião magnésio (Mg^{2+}). Isso leva a uma perda das propriedades de ligação, a formação da brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) e silicato de magnésio hidratado (MSH). A determinação do teor de iões de magnésio é assim essencial como parte da investigação em instalações industriais abandonadas ⁽³¹⁾.



Figura 47: A utilização de sais de magnésio na agricultura podem afetar futuras construções em antigos solos agrícolas [31].

Os investigadores Bönen e Cohen investigaram o efeito do sulfato de magnésio nas pastas de cimento Portland. Eles sugeriram que o ataque por iões magnésio levam à formação de uma camada de brucite nas superfícies expostas. Devido à baixa solubilidade da brucite, a penetração do Mg^{2+} abaixo da camada de brucite para o interior da pasta de cimento é restrita. No entanto, a formação da brucite consome uma quantidade elevada de hidróxido de cálcio (CH) já que o CH disponível esgota-se, logo o pH da solução dos poros diminui (27).

A fim de manter a sua estabilidade o silicato de cálcio hidratado (CSH) liberta CH para a solução em redor. Este processo acaba por contribuir para a descalcificação do CSH, e para a perda da resistência da estrutura cimentícia. Nos estágios avançados do ataque, o ião cálcio leva à formação de silicato hidratado de magnésio (MSH), que não tem propriedades cimentícias. Quando são usadas adições minerais, como p. ex: a sílica de fumo, a reação pozolânica consome hidróxido de cálcio. Daí que em betões com adições minerais o ataque por soluções de sulfato de magnésio avance rapidamente levando à descalcificação do CSH. No entanto, a redução da permeabilidade e refinamento da estrutura porosa com o uso de adições minerais pode inibir este efeito negativo. É, portanto, essencial que se avalie as dosagens de adições minerais para maximizar seus benefícios e minimizar os efeitos deletérios do ataque por sulfato de magnésio (27).

3.7 - Ataque bioquímico.

O ataque bioquímico é um fenómeno biológico que põe em risco as estruturas de betão e, conseqüentemente, as pessoas. O ataque bioquímico consiste num fenómeno no qual a atividade metabólica e o crescimento de microrganismos em determinadas zonas do betão podem levar à produção de ácidos, podendo dessa forma provocar a dissolução de compostos hidratados do betão, nomeadamente o hidróxido de cálcio além de silicatos hidratados (Shirakawa et al, 1998)(25).



Figura 48: Central de águas residuais, onde os ataques bioquímicos são o principal agente patológico no betão [32].

Ao consultar a bibliografia, é importante considerar os ataques por sulfatos e os ataques com ácido sulfúrico, uma vez que eles são ambos relevantes para determinar a resistência atual dos betões e das suas respectivas especificações para os ataques bioquímicos, como por exemplo, a corrosão pelo ácido sulfúrico biogénico (BSA⁵⁹) (25).

Para o caso específico do betão, um exemplo do ataque bioquímico por ação de micro-organismos é o das águas residuais alcalinas, que vêm atacando significativamente as estruturas de betão Portland, podendo provocar a formação de ácido sulfúrico (H_2SO_4) por um processo em que a ação das bactérias desempenha um papel relevante. As bactérias anaeróbias⁶⁰ nas águas residuais decompõem compostos inorgânicos ou orgânicos de enxofre, dando origem a sulfureto de hidrogénio (H_2S).

O H_2S , que é um gás, passa para o ar existente acima do líquido e dissolve-se na película de água sobre as paredes acima do nível da água, onde, sob a influência de bactérias aeróbias oxida dando origem ao H_2SO_4 . A pasta de cimento amolece perdendo resistência e provocando a queda do agregado. Existem diversos tipos de tratamentos preventivos. As águas residuais podem ser tratadas, por exemplo, com cloro para oxidar os sulfuretos, ou com cal para elevar o valor do pH para valores acima de 10, diminuindo a atividade das bactérias anaeróbias, ou então, com sais apropriados para provocar a precipitação do sulfureto. Outras situações em que o ataque por H_2SO_4 foi reportado incluem torres de arrefecimento e pisos de betão localizados em rochas contendo pirite⁶¹ (sulfato de ferro - FeS_2) (32).

Kovalenko e Karavaiko descreveram em 1981 a biodeterioração do betão de uma torre de arrefecimento na Rússia, onde verificaram que o fenómeno envolvia bactérias nitrificantes, bactérias redutoras de sulfato, cianobactérias e fungos filamentosos. Neste caso, o processo iniciava-se com o crescimento de bactérias heterotróficas, que se nutriam de lignossulfonatos

⁵⁹ Sigla inglesa de biogenic sulfuric acid (ácido sulfúrico biogénico).

⁶⁰ Essas bactérias sobrevivem em locais onde tem pouco ou nenhum oxigénio.

⁶¹ É um mineral de dissulfeto de ferro, FeS_2 . Tem os cristais isométricos que aparecem geralmente como cubos, mas também frequentemente como octaedros ou piritoedros (dodecaedros com faces pentagonais). Tem uma fratura ligeiramente desigual e conchoidal.

utilizados como aditivos no betão, para aumentar o poder de adesão entre as partículas sólidas presentes no mesmo.



Figura 49: Incrustações de plantas em calha de escoamento de águas pluviais em betão, Reitoria da UnB, Brasil.

A expansão destrutiva causada pela atividade das bactérias ocorre de sobremaneira em betões elaborados com agregados contendo dolomite, que reage com os iões hidróxido (OH⁻) na chamada reação de desdolomitização ⁽³²⁾:



O efeito foi observado pela primeira vez com alguns agregados canadianos, que também continham minerais de calcite e argila. Gillott e Swenson reviram as teorias do mecanismo de expansão, e concluíram que a expansão se deveu a absorção de água pelos minerais de argila, que foram expostas como um resultado da reação de desdolomitização. Em contraste, Tang et al. concluíram num estudo com a utilização do STEM⁶², que os minerais de argila estão presentes no material de matriz do agregado e não como inclusões na dolomite, e que a expansão foi causada principalmente pelo crescimento dos cristais de brucite em torno das superfícies dos grãos de dolomite, os minerais de argila, “criam” os caminhos através dos quais a solução alcalina poderá penetrar ⁽³²⁾.

As reações destrutivas associadas à desdolomitização também foram observadas com agregados dolomíticos no Bahrein, neste caso, possivelmente dificultado pela presença também de gesso. Van Aardt e Visser mostraram que podem ocorrer reações com feldspatos para dar origem a aluminato tetracálcico (C₄AH_x), álcalis e outros produtos, e que o C₄AH_x poderia reagir com o sulfato de cálcio (CaSO₄) para formar etringite. Eles concluíram que algumas rochas feldspáticas, tais como grauvaques e alguns xistos e arenitos, poderiam ser suspeitas no que diz respeito à reatividade na pasta de cimento. Way e Cole confirmaram a ocorrência de reações com feldspato, mas não encontraram nenhuma evidência de reações deletérias com agregados de granito ou basalto ⁽³²⁾.

⁶² STEM é a sigla inglesa de Scanning Transmission Electron Microscopy.

Em termos da inibição deste tipo de ataque, a utilização de fibra de vidro no betão ou em argamassas permite retardá-lo, mas não o eliminar ⁽³²⁾.



Figura 50: Danos provocados por um vazamento de um tubo de esgoto num supermercado, Brasília, Brasil.

No betão armado, o ataque bioquímico provocado pela ação dos microrganismos também está relacionado com a corrosão das armaduras e pode ter a sua origem na ação de dois tipos distintos de bactérias: as bactérias aeróbicas sulfoxidantes e as bactérias anaeróbicas redutoras de sulfato. Nessas circunstâncias, o sulfureto produzido biologicamente pode penetrar através do betão, seja pela permeabilidade dos poros do betão, ou por difusão, reagindo assim com a superfície da armadura, causando a corrosão (Moosavi, Dawson e King, 1985).

Como tem ocorrido em outros casos analisados neste trabalho, há uma grande controvérsia sobre este tipo de ataque químico. Um trabalho de referência sobre este assunto foi publicado pelo engenheiro Neville A.⁶³. Também é de se referir o desempenho dos cimentos com adições, por exemplo, com escórias granuladas de alto-forno (GGBS⁶⁴), que têm grande capacidade de resistência inerente aos sulfatos⁶⁵. As GGBS são usadas em quantidades cada vez maiores em betões, juntamente com outros materiais cimentícios secundários (SCMs⁶⁶), tais como cinzas volantes (PFA⁶⁷)₍₂₅₎.

Com as altas emissões de dióxido de carbono (CO₂) associadas à produção de cimento Portland, a utilização de materiais cimentícios secundários (SCMs) tem a vantagem de ser um subproduto de outros processos industriais e, como tal, poderem vir a ajudar na reduçãoda quantidade de CO₂ emitida. Para além das vantagens ambientais, os betões produzidos com

⁶³ Neville A. The confused world of sulfate attack on concrete. *Cem Concr Res* 2004;34(8):1275–96.

⁶⁴ Sigla inglesa de ground granulated blast-furnace slag (escória granulada de alto-forno).

⁶⁵ Building Research Establishment. BRE special digest 1, concrete in aggressive ground: part 1: assessing the aggressive chemical environment, 2nd ed.; 2003 e Higgins DD. Increased sulfate resistance of GGBS concrete in the presence of carbonate. *Cem Concr Compos* 2003;25(8):913–9.

⁶⁶ Sigla inglesa de secondary cementitious materials (materiais cimentícios secundários).

⁶⁷ Sigla inglesa de pulverised fuel ash (cinzas pulverizadas de combustível).

estes subprodutos são mais densos e duráveis a longo prazo, no entanto, são propensos a reduzir a resistência inicial do betão e requerem atenção especial na cura⁶⁸ (25).

Ao avaliar os métodos de ensaio utilizados por muitos investigadores, constata-se que existem opiniões contrárias⁶⁹, incluindo a inadequação dos ensaios de sulfatos, propostos como um método de análise da corrosão biológica num ambiente de águas residuais, enquanto outros estabelecem simultaneamente testes biológicos e químicos com ácido sulfúrico como a melhor metodologia⁷⁰. A participação do ião sulfato na corrosão por ácido sulfúrico (H_2SO_4) e por sulfatos residuais, por exemplo, presentes nas águas residuais de efluentes com matéria orgânica⁷¹, não pode ser ignorada⁽²⁵⁾.

Estudos in-situ, simulações e métodos de ensaio experimentais também fornecem uma valiosa visão sobre a natureza agressiva do ambiente em esgotos e estações de tratamento de águas residuais na qual as estruturas de betão se inserem. Isso também ajuda na caracterização das condições ambientais favoráveis ao início e ao alcance da corrosão por ácido sulfúrico biogênico, permitindo a investigação do papel desempenhado por ambas as bactérias reductoras de sulfato e oxidantes de enxofre (25).

Deste modo, conclui-se que a ação bacteriológica é, na realidade, uma causa secundária, ou seja, o ataque não ocorre pela ação direta das bactérias, mas sim devido ao seu ciclo de vida. Nas águas residuais, o hidrogénio sulfurado (ácido fraco) e o ácido fluorídrico (ácido forte), produzidos pelas bactérias, irão reagir com o betão, provocando assim a sua degradação. De maneira oposta, no ambiente marinho, diversas espécies de molusco efetivamente corroem as estruturas de betão, provocando perfurações no betão, para além da ação secundária destes e de outros organismos marinhos, tal como enunciado anteriormente.

3.8 - Corrosão das armaduras.

Com exceção de alguns metais qualificados de nobres, os metais são quase sempre encontrados na natureza na forma de compostos: óxidos, sulfuretos, etc. Isso significa que esses compostos são as formas mais estáveis para os respectivos elementos na natureza.

A corrosão pode ser vista como a tendência de um material retornar a um estado estável. Assim, por exemplo, quando uma peça de aço enferruja, o ferro, principal componente, está retornando à forma de óxido, que é o composto original do minério. A corrosão pode manifestar-se de várias formas. Algumas são mais frequentes que outras, e a ocorrência depende

⁶⁸ Containing ground granulated blast furnace slag and effects on the scaling resistance test at 28 days. *Cem Concr Compos* 2008;30(2):63–71 e Osborne GJ. Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete. *Cem Concr Compos* 1999;21(1):11–21.

⁶⁹ Monteny J, Vincke E, Beeldens A, De Belie N, Taerwe L, Van Gemert D, et al. Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. *Cem Concr Res* 2000;30(4):623–34 e Chang ZT, Song XJ, Munn R, Marosszeky M. Using limestone aggregates and different cements for enhancing resistance of concrete to sulfuric acid attack. *Cem Concr Res* 2005;35(8):1486–94.

⁷⁰ Monteny J, Vincke E, Beeldens A, De Belie N, Taerwe L, Van Gemert D, et al. Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. *Cem Concr Res* 2000;30(4):623–34.

⁷¹ Percheron G, Bernet N, Moletta R. Start-up of anaerobic digestion of sulfate wastewater. *Bioresour Technol* 1997;61(1):21–7.

muito do ambiente e dos processos usados. A forma mais generalizada das patologias existentes no betão é devida à corrosão⁷² das armaduras, principalmente em peças de betão aparente. A corrosão da armadura do betão é um processo eletroquímico. A água que está presente no betão serve de eletrólito. Qualquer diferença de potencial pode gerar uma corrente, iniciando o processo de corrosão (33).

Nos aços vulgarmente utilizados nas construções, encontram-se grãos de ferro quase puros (ferrite) e grãos de uma combinação de ferro com carbono (cementite). A cementite funciona como cátodo em relação à ferrite, pelo que a corrosão do aço se pode dar desde que haja um eletrólito que ponha em contato os dois componentes. Por outro lado, o trabalho mecânico sofrido pelo aço contribui para a heterogeneidade da superfície. Nas regiões tracionadas os eletrões tendem a sair dando origem a zonas anódicas e nas regiões comprimidas tendem a se formar zonas catódicas. O contato elétrico destas zonas, através de um eletrólito, é também uma causa para a corrosão (34).

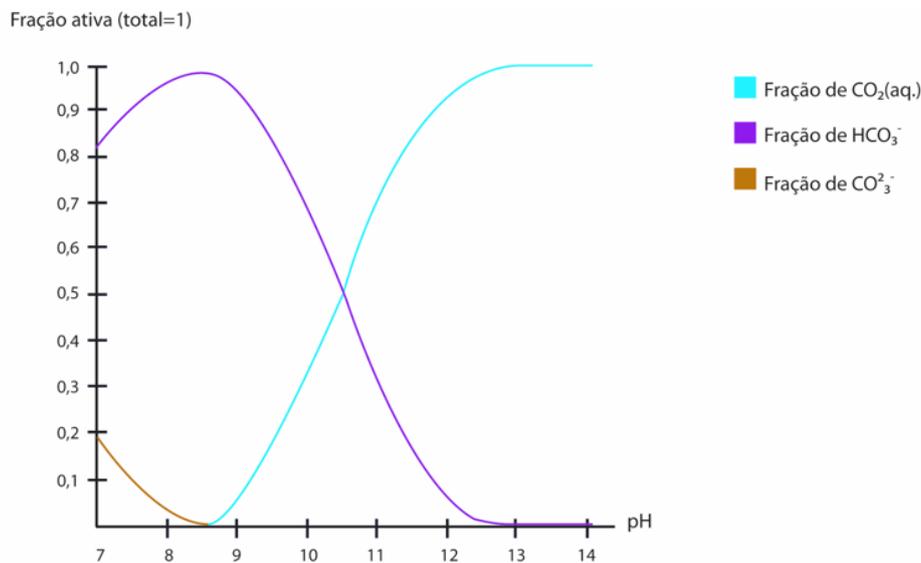


Figura 51: Distribuição relativa do dióxido de carbono aquoso (CO₂(aq)), bicarbonato (HCO₃⁻) e carbonato (CO₃²⁻) em função do pH a 25°C (adaptado)^[33].

A elevada alcalinidade existente no betão permite que as armaduras no seu interior estejam passivamente protegidas da corrosão. Na presença de valores elevados de pH forma-se uma camada de óxidos microscópica na superfície dos varões (película passiva), que impede a dissolução do ferro, impedindo assim a corrosão, e garantido a conservação da armadura no interior do betão. Desta forma os fatores que mais influenciam a corrosão das armaduras são a carbonatação, a penetração de cloretos e por fim a lixiviação dos álcalis pela água corrente (provocada pela redução do pH do betão). Se o pH baixar para valores abaixo de 10 (tornando-se assim menos alcalina e cada vez mais ácida, ou se o teor em cloretos exceder um valor crítico), a película passiva e a respectiva proteção anticorrosiva serão eliminadas, deixando o aço exposto aos fenómenos de corrosão (34).

⁷² A corrosão metálica é a transformação de um material metálico ou liga metálica pela sua interação química ou eletroquímica num determinado meio de exposição, processo que resulta na formação de produtos de corrosão e na libertação de energia.

Assim, a carbonatação do betão é a ação dissolvente do anidrido carbónico do ar no cimento hidratado, provocando a redução do pH do betão. O grau de penetração da carbonatação no interior do betão depende da permeabilidade, da quantidade de substâncias carbonatáveis e da humidade relativa do ar ambiente. O grau de difusão de iões de cloro no betão depende essencialmente da densidade deste, do seu conteúdo de cloretos no meio exterior e do tipo de difusão verificado ⁽³⁴⁾.

Os iões de cloro livres existentes na água dos poros do betão (mesmo em betões não carbonatados), são capazes de romper a película passiva na superfície do aço. É de notar que em ambientes secos a corrosão não ocorre, dado que para haver corrosão do aço é indispensável à existência de humidade e oxigénio. Somente o oxigénio será consumido, mas, a humidade é essencial para dar seguimento ao processo eletrolítico, e desta forma ocorrer à corrosão das armaduras. Os efeitos de molhagem e secagem da água contendo cloretos, sobre a superfície do betão, possibilitam a deposição de uma quantidade cada vez maior de cloretos na camada superficial. A corrosão do aço provoca o aumento de volume (o óxido de ferro pode chegar a ter 10 vezes o volume do ferro), gerando tensões no interior do betão. Desta forma e devido às tensões no interior do betão, surgem fendas longitudinais e dá-se o destacamento da camada de betão que recobre as armaduras (camada de recobrimento). A espessura da camada de recobrimento é, portanto, o fator mais importante no processo de corrosão, dado que quanto maior for a sua espessura, mais difícil será a difusão do oxigénio e maior será a proteção conferida às armaduras ⁽³⁴⁾.

O processo de ataque do betão inicia-se de fora para dentro. Como já foi referido, é a camada de recobrimento que assegura a proteção do aço (além de assegurar a aderência aço-betão). É, portanto uma camada que deve ser preservada ao longo da vida útil de uma estrutura, dado que a qualidade do betão endurecido não depende apenas da qualidade do betão fresco, mas, também da sua colocação nos moldes, da compactação e da cura. A previsão do período de conservação das propriedades da camada de recobrimento poderá ser falível ⁽³⁴⁾.

A corrosão tem, como consequência, uma diminuição da seção de armadura e fissuração do betão em direção paralela a esta. Eventualmente, podem surgir manchas avermelhadas produzidas pelos óxidos de ferro. As fissuras ocorrem porque os produtos da corrosão ocupam espaço maior que o aço original. As causas são variadas, entre as quais se destacam ⁽³³⁾:

- Insuficiência ou má qualidade do betão de recobrimento da armadura;
- Presença de cloretos.

Todas essas causas serão tratadas no seguimento deste trabalho.

3.8.1 - Carbonatação.

A penetração de dióxido de carbono gasoso dentro do betão, parcialmente, saturado, geralmente inicia uma série de reações com ambos os iões dissolvidos na solução dos poros e na pasta de cimento hidratada ⁽¹²⁾.

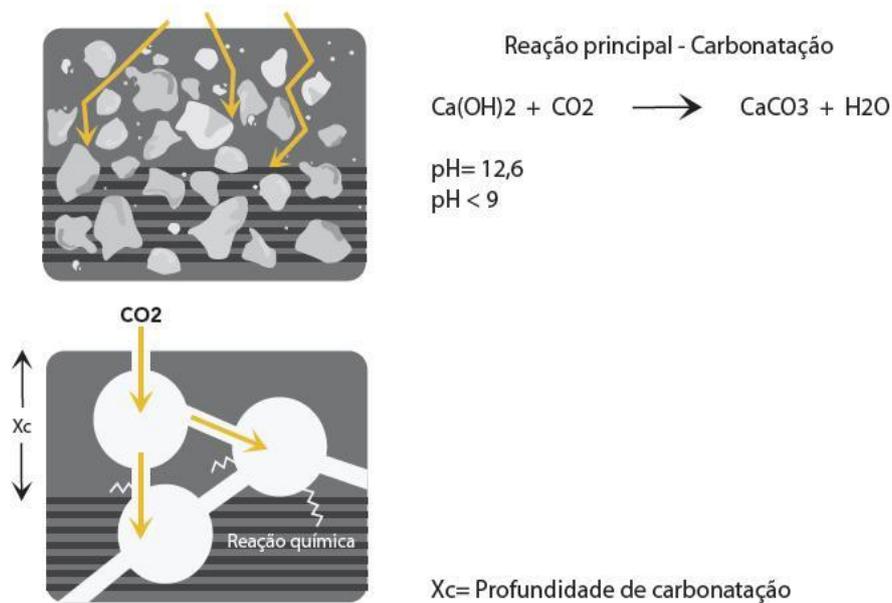


Figura 52: Representação esquemática do processo de carbonatação no betão (adaptado) [34].

Essa reação designa-se por carbonatação e é um dos mecanismos mais correntes de deterioração do betão armado. O dióxido de carbono presente no ar penetra nos poros do betão e reage com o hidróxido de cálcio formando carbonato de cálcio e água (35). Porém, num betão totalmente saturado de água não haverá carbonatação, pois a difusão do dióxido de carbono (CO₂) não é possível através dos poros do betão.

Este processo é acompanhado pela redução da alcalinidade do betão. Num betão homogêneo, a carbonatação progride com a frente paralela à superfície. Quando a frente de carbonatação atravessa o recobrimento das armaduras, estas ficam despassivadas (devido à perda de alcalinidade), permitindo o início da sua corrosão (desde que existam água e oxigénio), comprometendo, deste modo, a durabilidade do betão (35).

A carbonatação é o termo genérico dado à neutralização do betão pela reação entre os componentes alcalinos da pasta de cimento e de dióxido de carbono (CO₂) existente na atmosfera. Uma vez que a reação se processa em solução, a primeira indicação de carbonatação é a diminuição do pH da solução dos poros para cerca de 8.5⁷³, nível na qual o filme passivo sobre o aço deixa de ser estável. Quando a frente de carbonatação atinge a armadura de aço, em geral ocorre a depassivação⁷⁴ em grandes áreas ou sobre toda a superfície do aço levando à corrosão geral do aço (36).

A entrada de gases no interior do betão é maior com baixa humidade relativa no ar, mas a reação entre o gás e a pasta de cimento ocorre em solução, o que implica que esta seja maior quanto maior for a humidade. Assim, o meio mais agressivo para a neutralização do betão será o

⁷³ Roberts, M. H., "Carbonation of Concrete Made with Dense Natural Aggregates," *Publication Ip6/81*, Building Research Establishment, Garston, UK, Apr. 1981.

⁷⁴ Adolf, M., "Investigations of the Carbonation of Concrete," *Supplementary Paper III-52*, 5th International Symposium on Chemistry of Cement, Tokyo, 1968, pp. 394-40 e Schiesel, P., "Corrosion of Reinforcement," *Durability of Concrete Structures*, CEB-Rilem International Workshop, Copenhagen, 1983, pp. 73-93.

de ciclos alternados de humidade e secagem e de temperaturas elevadas⁷⁵. Em condições constantes, uma humidade relativa de 60% é o ambiente mais favorável para a ocorrência da carbonatação⁷⁶. Três outros fatores importantes que influenciam o tempo de iniciação da corrosão induzida por carbonatação são: recobrimento das armaduras, a presença de fissuras, e a alta porosidade associada à alta razão água/cimento⁽³⁶⁾.

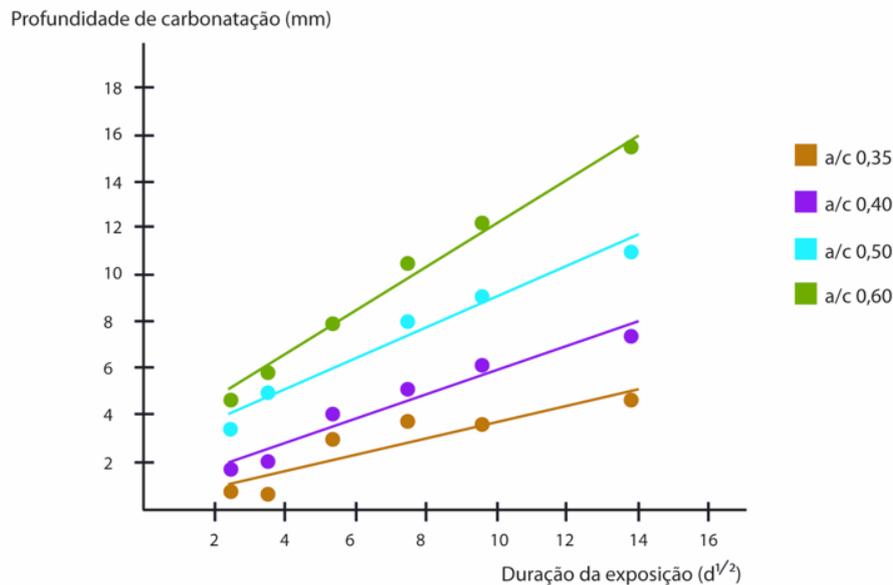


Figura 53: Profundidades de carbonatação medidas com fenolfetaína em vários provetes expostos a ambientes com 50% de HR, 5% de CO_2 (Profundidades de carbonatação em função da raiz quadrada do tempo) (adaptado) [33].

Todo o processo pode ser resumido como uma série de diferentes etapas. Primeiro, o dióxido de carbono gasoso penetra no material, em seguida, ele dissolve-se na solução dos poros, principalmente como bicarbonato (HCO_3^-) e carbonato (CO_3^{2-}), o CO_3^{2-} reage de seguida com o cálcio dissolvido para precipitar na forma de calcite (CaCO_3), além de se combinar com outros compostos hidratados, como os aluminatos. A queda do pH associado a essas reações leva à dissolução da portlandite, sendo esses os estágios iniciais de carbonatação, juntamente com os valores críticos para a pressão parcial de CO_2 (P_{CO_2})⁷⁷ (12).

Felizmente, as taxas de carbonatação no betão são geralmente baixas. As estruturas de betão perto de uma zona industrial, no entanto, apresentam taxas mais altas de carbonatação devido ao aumento da concentração de dióxido de carbono (CO_2) em ambientes industriais. Sob condições naturais, a concentração atmosférica de CO_2 no ar é de 0,03%, nas cidades isso é geralmente aumentado para 10 vezes desse valor, enquanto que em zonas industriais pode ser superior a 100 vezes⁽³⁶⁾.

A taxa de carbonatação depende de vários fatores, particularmente da permeabilidade do betão (quanto mais permeável, maior será a taxa de carbonatação), e da humidade relativa (a carbonatação ocorre mais facilmente quando a humidade relativa se situa entre 55 e 75 por cento)⁽³⁵⁾. O cimento hidratado Portland possui um pH de aproximadamente 12,5. Este pH

⁷⁵ Pfeifer, D. W., and Scali, M. J., "Southern Climate Accelerated Test Method," *NCHRP Report No. 244*, National Cooperative Highway Research Project, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., 1981.

⁷⁶ Tuutti, K., "Corrosion of Steel in Concrete," Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, No. 4, 1982, 469 pp.

⁷⁷ T. Matschei, B. Lothenbach, F.P. Glasser, The AFm phase in Portland cement, *Cement and Concrete Research* 37 (2007) 118–130.

protege o aço contra a corrosão, porém, o hidróxido de cálcio do betão reage com o gás carbónico da atmosfera, de acordo com a seguinte reação ⁽³³⁾:

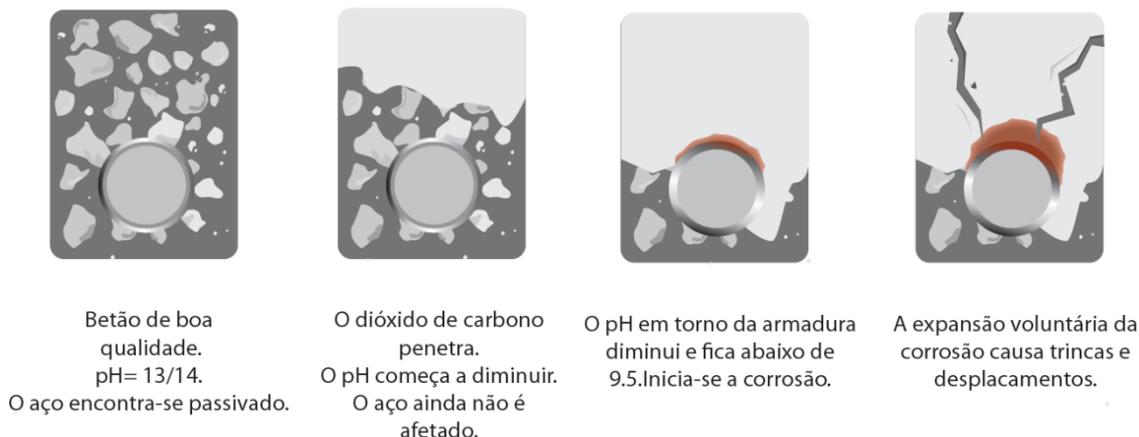
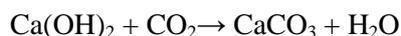


Figura 54: Representação esquemática da corrosão da armadura causada pela carbonatação (adaptado) ^[35].

Assim, o pH da pasta de cimento é reduzindo para 9 tornando possível a corrosão da armadura. No entanto o tempo que a carbonatação leva para atingir a profundidade onde se encontra o aço depende (deste que mantidas todas as demais condições), da espessura do recobrimento e da permeabilidade dessa pasta. Esta pode ser associada à resistência mecânica do betão (que depende da razão água/cimento) e do grau de compactação ⁽³³⁾.

Com a utilização do dobro da espessura normalmente utilizada no recobrimento, multiplica-se por quatro o período de tempo que a carbonatação levará para atingir a armadura, o aumento do fator água/cimento provoca uma elevação exponencial na velocidade de carbonatação do betão. A profundidade de carbonatação nos betões com a mesma idade, elaborados com uma razão água/cimento de 0,5, podem ser 1/3 da observada em betões com razão água/cimento de 0,8 ⁽³³⁾.

São inúmeros os parâmetros envolvidos na previsão da profundidade da carbonatação nas estruturas, no entanto, os fatores que mais afetam a corrosão que ocorre nas armaduras das estruturas de betão armado classificam-se principalmente em:

- Fatores externos (concentração de dióxido de carbono (CO_2), a temperatura e a humidade relativa do ar, uma vez que vão determinar o grau de saturação dos poros);
- Fatores internos (composição química do betão, o traço específico e a qualidade de execução).

Para além destes fatores outros devem ser considerados, como a razão água/cimento, as condições de cura, o grau de hidratação, a quantidade e tipo de cimento utilizado e a concentração de dióxido de carbono no ambiente onde a estrutura de betão está sujeita.

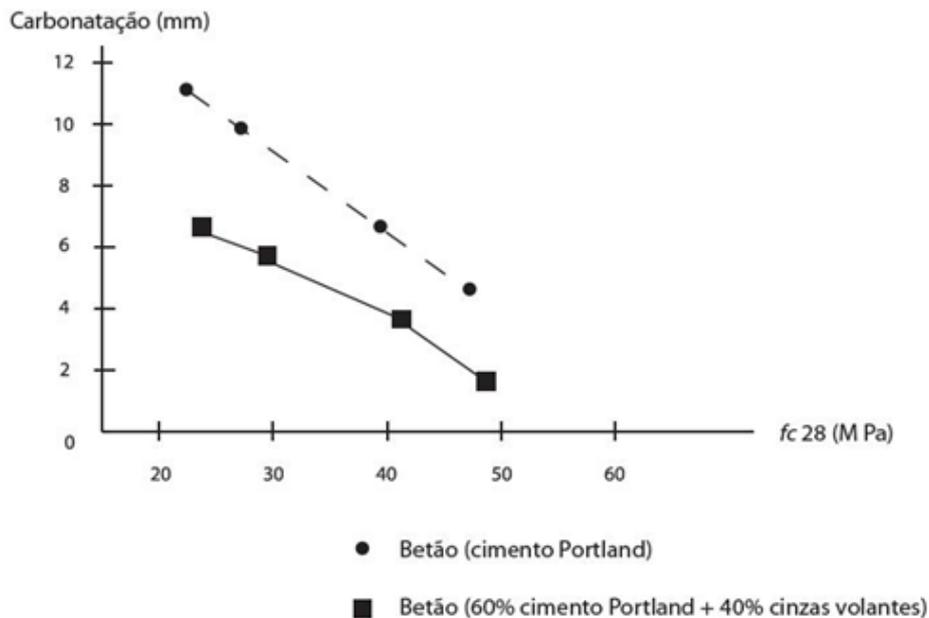


Figura 55: Influência da resistência à compressão do betão sobre a profundidade de carbonatação (adaptado) [36].

Segundo diversos autores o processo de carbonatação depende fortemente de fatores tais como:

- Pressão de penetração do agente agressivo e da humidade relativa (Neville, 1997);
- Influência da concentração de dióxido de carbono (CO_2) e das condições de exposição, tais como a humidade e temperatura (Uomoto e Takada 1993);
- Difusão, que é influenciada principalmente pela qualidade do betão e pelas condições de exposição (Liang Qu e Liang 1986).

A resistência à compressão do betão (fig. 55) constitui um bom indicador da velocidade com que a carbonatação decorre, apesar de não ser um fator que influencie de forma direta a carbonatação. No entanto, segundo Figueiredo et al (1994), existem várias fórmulas empíricas que relacionam a espessura de carbonatação com a resistência característica aos 28 dias, para que assim se possa determinar a profundidade de carbonatação do betão.

Existem vários métodos para verificar se uma dada zona do betão se encontra ou não carbonatada, assim como existem métodos práticos que nos permitem determinar a profundidade de carbonatação.

Num dos métodos, a profundidade da carbonatação pode ser medida aspergindo-se sobre a superfície do betão (imediatamente após a fratura), um indicador de pH como, por exemplo, a fenolftaleína. Desta forma a área não carbonatada é tingida de rosa (33).

Além da fenolftaleína, também podem ser utilizados outros indicadores químicos como timolftaleína e o amarelo de alizarina.



Figura 56: Danos causados pela carbonatação em uma estrutura de betão armado [37].

O que o indicador faz na realidade é reagir com a fase líquida contida nos poros do betão e exibir a cor correspondente ao intervalo do valor do pH que se verifica. A especificação E391 do LNEC estipula um procedimento baseado na recomendação RILEM CPC – 182, para determinar a profundidade de carbonatação. Mas, no entanto a utilização deste método requere que os pontos de medição sejam criteriosamente selecionados, de forma a se poderem comparar as diferentes medições obtidas. Esta seleção tem, também, em conta o tipo de controle que se pretende fazer e o grau de rigor pretendido. Os elementos estruturais com as superfícies expostas aos agentes ambientais deverão ser objeto de um maior número de medições (35).



Figura 57: Extração de uma carote de um pilar de betão para a medição da profundidade de carbonatação [38].

A escolha exata do ponto de medição terá que ter em conta a posição das armaduras, que serão localizadas previamente com um detector metálico, para que estas não sejam danificadas. Os pontos selecionados serão devidamente identificados e localizados numa planta da estrutura. A profundidade dos furos ou das cavidades será de, pelo menos, 1 cm do recobrimento medido com o detector de metais (35).

A limpeza correta do furo é essencial para a fiabilidade dos resultados, que deixará de ter validade se existirem resíduos de pó das zonas interiores não carbonatadas (com alcalinidade elevada). Com a utilização de um borrifador com a solução alcoólica de fenolftaleína molham-se as superfícies internas do furo de ensaio e observa-se a sua coloração. A zona carbonatada apresenta-se incolor, e a não carbonatada deverá apresentar uma coloração rosada, sendo possível medir a profundidade da frente de carbonatação na transição de uma zona para a outra (35).

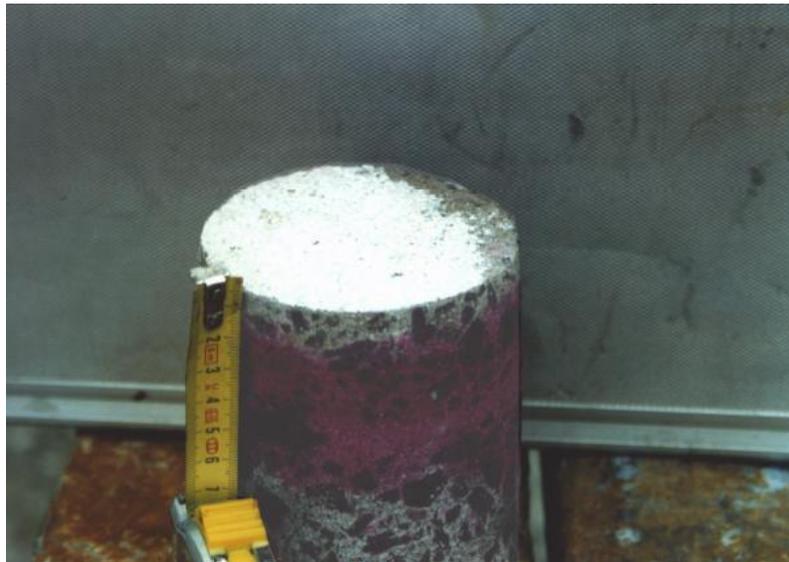


Figura 58: Medição da frente de carbonatação com uma solução alcoólica de fenolftaleína [39].

Um outro procedimento alternativo à extração da amostra de betão é muito usado em estudos de diagnóstico, consiste em perfurar com uma broca a estrutura a analisar de mm em mm, para assim se medir a frente de carbonatação, recorrendo mais uma vez à aspersão de fenolftaleína para dentro do furo. Depois do procedimento efetuado, os furos são preenchidos com argamassa. No entanto é recomendado que a leitura da profundidade de carbonatação se dê o mais rapidamente possível logo após a extração do provete, uma vez que com o passar do tempo a coloração da fenolftaleína tende a esbater-se.

Ensaio realizados mostraram que esta técnica só dá uma estimativa aproximada da profundidade da carbonatação. Usando uma técnica semelhante à abordagem ácido-dissolução para a medição do perfil de cloretos os investigadores Houst e Wittmann⁷⁸ (2002), conseguiram medir os perfis de carbonato em cimentos expostos por 40 meses em ambiente ao ar livre. Os resultados mostram que os perfis de carbonato estenderam bem além da profundidade indicada pela fenolftaleína. Medidas semelhantes foram relatadas por Baroghel Bouny e Chaussadent⁷⁹ (2004). Perfis de calcite foram medidos em amostras de pasta cimentícias mantidas em ambiente de carbonatação acelerada (12).

Perfis de portlandite também foram determinados. Os resultados mostram uma queda de portlandite perto da superfície exposta, onde o conteúdo da calcite atinge o seu valor máximo.

⁷⁸ Y.F. Houst, F.H. Wittmann, Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation, *Cement and Concrete Research* 32 (2002) 1923–1930.

⁷⁹ V. Baroghel-Bouny, T. Chaussadent, Transferts dans les bétons et durabilité des ouvrages, *Bulletin du Laboratoire Ponts et Chaussées* 248 (2004) 93–111.

De acordo com estas medições, hidróxido de cálcio residual ainda está presente perto da interface ambiente/sólido, mesmo que o material esteja carbonatado (12).



Figura 59: Com o valor da profundidade da carbonatação e com auxílio de um esclerômetro pode-se determinar a dureza à superfície do betão(40).

O processo de carbonatação não tem por si só, um efeito negativo sobre as propriedades do betão. Em alguns casos, pode mesmo resultar em uma redução da porosidade do material favorecendo a formação de uma camada protetora na superfície do betão. No entanto, a queda do pH associado com o processo pode ter um efeito potencialmente negativo sobre as estruturas de betão armado, destruindo a camada passiva em torno do aço (12).

Estudos recentes sugerem uma ligação entre o ingresso de cloretos e a carbonatação⁸⁰. Na presença de dióxido de carbono (CO_2) gasoso, a fase sólida principal, formada a partir da reação entre cloretos e uma pasta de cimento hidratado, tende a reagir. Esta reação liberta iões cloreto (Cl^-) para a solução dos poros. Dependendo dos gradientes de concentração no material, o cloreto assim, libertado pode chegar à armadura e iniciar a corrosão da mesma (12).

Por fim, ocorre o processo de descalcificação que é geralmente descrito pela dissolução da portlandite e silicato de cálcio hidratado (CSH) no cimento hidratado exposto à água pura, mesmo que a dissolução possa ser observada em outros ambientes, como água do mar. A lixiviação dos iões metálicos (principalmente portlandite) a partir da solução dos poros para o ambiente externo é responsável pela dissolução destes hidratos (12).

Este fenómeno afeta tipicamente as estruturas que tenham estado em contato com águas puras e ácidas por longos períodos: barragens, tubulações de água, instalações de eliminação de resíduos radioativos, etc. Nas últimas duas décadas, este tema tem sido identificado como um assunto de grande relevância para o armazenamento de resíduos nucleares. A química do ataque foi descrita por Dow e Glasser⁸¹. Eles mostram como regimes de passivação e os ataques podem ser distinguidos. As consequências da lixiviação iónica são o aumento da porosidade e permeabilidade, e uma perda de resistência mecânica (12).

⁸⁰ T. Ishida, K. Kawai, R. Sato, Experimental study on decomposition processes of Friedel's salt due to carbonation, in: K. Kovler (Ed.), Proc. Int. RILEM-JCI Seminar on Concrete Durability (ConcreteLife'06), 2006, pp. 51–58, Ein-Bokek (Israel).

⁸¹ C. Dow, F.P. Glasser, Calcium carbonate efflorescence on Portland cement and building materials, Cement and Concrete Research 33 (2003) 147–154.

Para a proteção quanto à carbonatação, qualquer barreira que se oponha à difusão através da superfície, tem como consequência a diminuição da velocidade de carbonatação, quer esta se trate de sistemas de impregnação ou revestimentos na superfície, a finalidade do sistema é a mesma, ou seja, atuar como uma barreira física à penetração dos agentes agressivos.

São diversos e variadíssimos os sistemas de proteção contra a carbonatação existentes no mercado atualmente, de entre eles, se destacam as pinturas selantes e até mesmo aditivos adicionados à pasta fresca de betão.

3.8.2 - Ingresso de cloretos.

Com o passar dos anos, os profissionais de engenharia têm-se deparado cada vez mais com a problemática da corrosão das armaduras nas estruturas de betão armado. O correto diagnóstico e a explicação para uma estrutura corroída não é simples nem direto. Isso se deve às diversas variáveis que intervêm no processo corrosivo e devido a inúmeras causas ⁽³⁷⁾.

A corrosão das armaduras é um problema crítico para as estruturas de betão armado, devido ao severo comprometimento da segurança e da capacidade de serviço das estruturas. Os principais fatores que provocam a corrosão do aço são ⁽³⁷⁾:

- O meio ambiente, no qual a estrutura está inserida;
- O recobrimento inadequado das estruturas de betão.

Neste último caso, o recobrimento é responsável tanto pela proteção física (devido à criação da barreira proporcionada pelo recobrimento), como pela proteção química da armadura, quando este propicia um meio alcalino elevado com a consequente passivação da mesma ⁽³⁷⁾.

Em 1997 Panossian definiu a corrosão como sendo a “transformação de um metal ou ião metálico, pela sua interação química ou eletroquímica com o meio em que este está inserido”. De acordo com o ambiente e a natureza do processo, a corrosão pode ser classificada como sendo química ou eletroquímica. A corrosão química no aço é um ataque resultante de uma reação entre um gás e um metal, ocasionando a formação de uma película uniforme de óxido de ferro. Este processo é muito lento e é praticamente inócuo à temperatura ambiente, a não ser que existam gases extremamente agressivos na atmosfera ⁽³⁷⁾.

A corrosão eletroquímica consiste numa corrente elétrica ou no deslocamento de eletrões de um local para outro do metal, deslocamento este que pode ocorrer de maneira espontânea ou através de uma força elétrica externa. O local da superfície metálica onde se dá a oxidação do átomo metálico recebe o nome de ânodo e onde ocorre a redução de uma espécie presente no meio recebe o nome de cátodo ⁽³⁷⁾.

Deste modo o estudo dos fenómenos da corrosão do aço e das suas causas é de extrema importância. Em todo o mundo, a corrosão por ingresso de cloretos é a causa predominante dos danos verificados em estruturas de betão armado localizadas em um ambiente de sal marinho ou

de sal de degelo ou em outros ambientes onde a presença de iões cloretos se faz sentir. Evitar tais danos durante a vida do projeto é uma das tarefas do engenheiro.

Os sais do ácido clorídrico (HCl) contêm iões cloro e são chamados cloretos. Um exemplo é o sal de mesa que contém cloreto de sódio (NaCl). A palavra cloreto pode também indicar um composto químico no qual um ou mais átomos de cloro formam uma ligação covalente. Isto significa que os cloretos podem estar em compostos orgânicos e inorgânicos (38).

O ingresso dos cloretos no betão pode ocorrer de diversas maneiras, numa delas, os cloretos podem ser adicionados involuntariamente na fabricação do betão a partir da utilização de agregados ou de águas contaminadas (ou mesmo de ambos), de aditivos aceleradores de presa e endurecimento, ou ainda, podem penetrar desde o exterior através da rede de poros do betão (sendo este o processo mais comum) (37).

Cl _r (% em massa do cimento)		
água/cimento	XS1;XS2	XS3
$a/c \leq 0,30$	0,6	0,5
$0,30 < a/c \leq 0,40$	0,5	0,4
$a/c \geq 0,40$	0,4	0,3

Quadro 13: Teor crítico de cloretos em função da classe de exposição do betão, especificação LNEC E465.

A penetração dos cloretos é determinada em parte pela difusão do ião cloreto. Durante o contato do betão com a água contendo iões cloreto, a concentração destes iões nas águas provenientes do exterior é geralmente maior do que a da água intersticial existente dentro do betão. Como consequência direta da lei da física que diz que uma diferença de pressão ou concentração dá origem a um processo de “nivelamento”, os iões cloreto difundem-se para o interior, anulando assim a diferença de concentrações (39).

Na realidade, o ingresso de cloretos não é unicamente determinado por um gradiente de concentrações entre o interior e o exterior do betão. Parte do cloreto de “invasão” poderá ser transportado com a água salgada que foi “sugada” por capilaridade no betão seco (39).

Este processo é conhecido por causar uma rápida penetração de cloretos no interior do betão. Além disso, tal ação pode levar à acumulação de cloretos como, por exemplo, acontece com o vulgar sal que permanecerá no betão após a evaporação da água absorvida por este. Todas as estruturas de betão expostas à maresia, à água do mar ou aos sais de degelo, estão constantemente expostas a estes ciclos de absorção capilar, evaporação e de acumulação de sais no seu interior. No que se refere à superfície da estrutura de betão, esta, em contato com o ar possuirá um teor de humidade em constante alternância, enquanto que logo abaixo da superfície do betão o teor de humidade é relativamente constante ou lentamente alternado (39).

Os cloretos de origem externa no betão originam-se, como referido anteriormente, a partir dos sais de degelo, da atmosfera marinha (nas estruturas próximas do mar), da lavagem de fachadas e pisos com ácido muriático⁸², das atmosferas industriais, dos produtos corrosivos armazenados em tanques industriais, etc.

⁸²O ácido clorídrico em sua forma de baixa pureza e com concentração não informada, é conhecido como ácido muriático (muriático significa pertencente a salmoura ou a sal), sendo vendido sob essa designação para a remoção de manchas resultantes da humidade em pisos e paredes de pedras, azulejos, tijolos e outros.

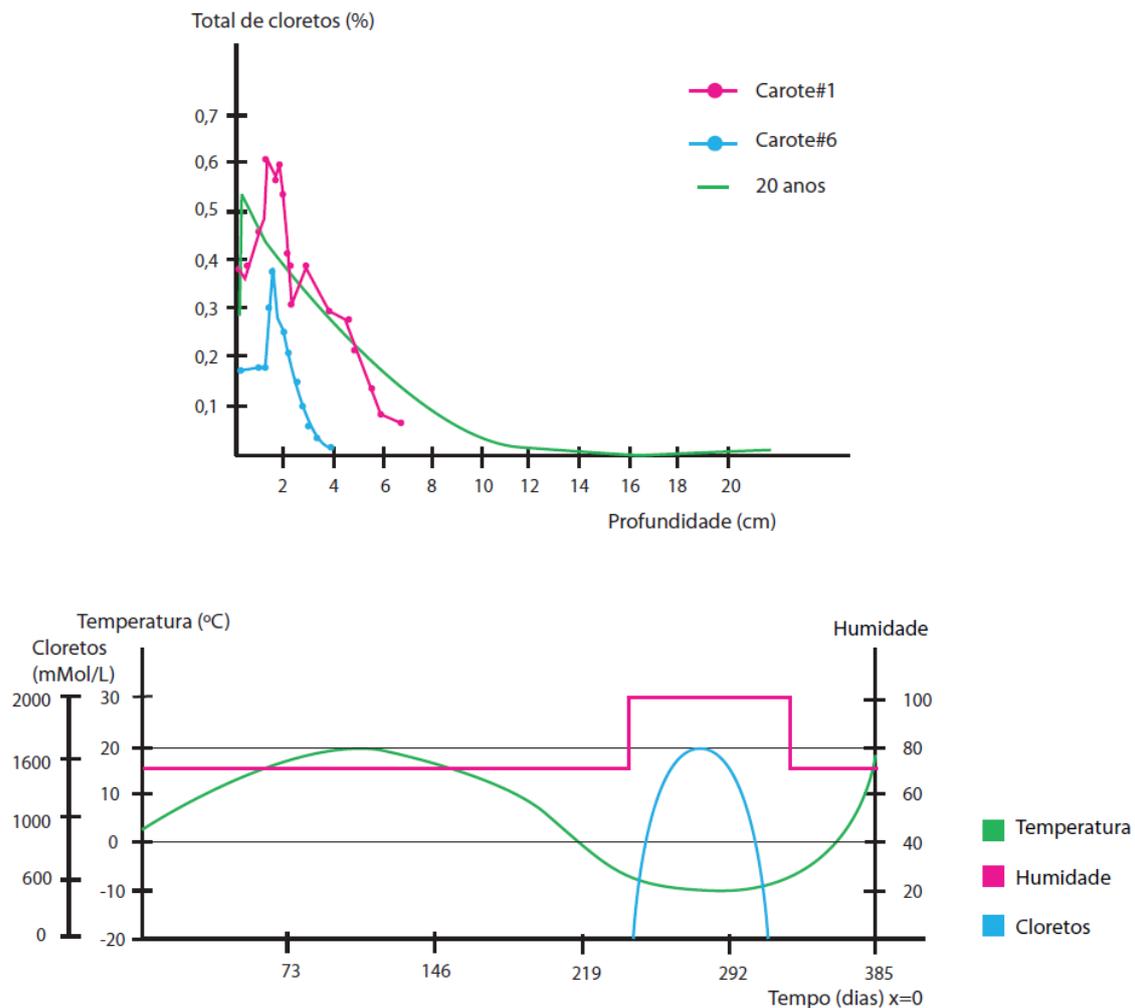


Figura 60: Comparação entre os perfis totais de cloretos previstos e medidos numa estrutura destinada ao estacionamento de viaturas com 20 anos de idade. O gráfico menor ilustra a variações climáticas na estrutura durante 1 ano (adaptado) [41].

A figura anterior mostra que com o tempo a penetração dos cloretos atinge maiores profundidades, afetando assim cada vez mais o interior da estrutura de betão, no entanto é de se salientar a relação entre a alta humidade e baixa temperatura, para um maior ingresso de cloretos no interior do betão. De acordo com Figueiredo (1994), os iões cloreto podem ser encontrados no interior do betão na forma quimicamente combinada (cloroaluminatos), fisicamente adsorvidos na superfície dos poros e livres na solução dos poros do betão. É conhecido que o aluminato de cálcio e o aluminoferrato de cálcio (ambos constituintes do cimento Portland anidro) podem formar cloroaluminatos de cálcio insolúveis, sendo estes muito importantes no que se refere à capacidade de remover os iões cloreto livres da solução (38).

Desta forma o nível de agressão dos iões cloreto depende muito da quantidade deste ião presente no meio ambiente ou inserido no betão. O teor de cloretos a partir do qual causam a corrosão do aço é denominado de valor limite (38). No entanto, nem todos os cloretos presentes no betão podem contribuir para a corrosão do aço, alguns dos cloretos reagem quimicamente com componentes do cimento, tais como aluminatos de cálcio para formar cloroaluminatos de cálcio, e são efetivamente removidos da solução dos poros (36).

Com a carbonatação do betão, os cloretos são libertados e interagem no processo de corrosão. Investigações recentes⁸³ indicam que alguns cloretos também acabam por ficar fisicamente presos, ou por adsorção ou nos poros que não estão interligados entre si. A fração de cloretos totais disponíveis na solução dos poros para causar ruptura do filme passivo sobre o aço é função de uma série de parâmetros incluindo o aluminato tricálcico (C_3A) e aluminoferrato tetracálcico (C_4AF), pH, razão água/cimento, e se o cloreto foi adicionado à mistura de cimento ou se penetrou no betão endurecido (36).

O valor limite da concentração de cloretos abaixo do qual uma corrosão significativa não ocorre, também depende desses mesmos parâmetros, mas esses fatores às vezes trabalham em oposição. Por exemplo, quanto maior o pH, maior é a quantidade de cloretos que o aço pode tolerar, sem que ocorra a corrosão, mas a quantidade de cloretos presentes na solução para um determinado teor de cloretos total também aumenta com o pH (36).

Alguns investigadores têm mostrado que a iniciação da corrosão do aço, não é dependente apenas da concentração de iões cloreto, mas também sobre a concentração do ião hidróxido (OH^-) e, especificamente, da razão ião cloreto/ião hidróxido (Cl^-/OH^-). O valor máximo de Cl^-/OH^- que pode ser tolerado sem a destruição do filme passivo demonstrou ser de 0,29 com o pH de 12,6 e 0,30 com o pH de 13,3 (36).

É importante mencionar que o fenómeno de carbonatação do betão afeta a estrutura de poros e elimina a capacidade de ligação dos cloretos, por conseguinte, os cloretos são libertados para a pasta durante a carbonatação. Isto vai fazer com que os iões cloreto sejam “arrastados” para maiores profundidades através do sistema de poros do betão. A mudança de estrutura de poros devido à carbonatação é tal que, geralmente, a porosidade total diminui, enquanto aumenta a porosidade capilar, facilitando assim o ingresso dos cloretos ainda mais para o interior do betão (39).

Em 1972 Biczok definiu que, a presença de cloretos geralmente favorece a resistência do cimento Portland em face de um ataque por sulfatos. O processo de formação de sulfoaluminato de cálcio, produzido pelos sulfatos é um processo mais lento quando na presença de iões cloreto. Outro agravante para as estruturas de betão é a presença do ataque conjunto dos cloretos e da carbonatação do betão. Isso se deve, como mencionado, ao fato de que um betão carbonatado não possui a mesma capacidade de combinar os iões cloreto como num betão “são” (38).

De acordo com a European Standard ENV 1504-9, a principal consequência do ingresso dos cloretos nas estruturas de betão é a fissuração, que resulta do aumento de volume dos produtos de corrosão. Este aumento de volume pode ser até 10 vezes superior ao volume inicial do aço, podendo causar pressões internas maiores que 15 MPa, chegando, em alguns casos, até 40 MPa. Também como consequência do ingresso dos cloretos há a redução da aderência do aço ao betão, a redução da seção das armaduras e a deterioração das propriedades mecânicas do aço. Para evitar tais danos recorre-se geralmente a sistemas de proteção superficial que consistem numa proteção adicional do betão de recobrimento, e na criação do efeito “barreira”. Estes sistemas criam as medidas preventivas que:

⁸³Bentz, E. C.; Evans, C. M.; and Thomas, M. D. A., “Chloride Diffusion Modeling for Marine Exposed Concrete” Fourth International Symposium on Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, SCI, Cambridge, UK, 1996, pp. 136-145.

- Evitam a corrosão das armaduras;
- Reduzem a penetração da água (impedem as reações expansivas internas, ciclos de gelo/degelo e o ingresso de íões cloreto (Cl⁻));
- Protegem fisicamente a superfície (erosão e impacto);
- Protegem o betão contra as ações químicas.



Figura 61: Corrosão nos cabos de pré-esforço de uma estrutura de betão pré-esforçado [22].

Em estruturas onde o processo de degradação já esteja a ocorrer, há que se proceder à execução de medidas para a sua mitigação. Existem diversos sistemas de proteção e reparação que dependem do tipo de betão e das condições de exposição, assim como dos diferentes estados e processos de degradação da estrutura.

Na Norma Européia EN 1504 estão especificadas as diferentes técnicas e produtos, sendo de destacar as partes:

- 2 (Sistemas de proteção superficial);
- 9 (Princípios gerais para o uso de produtos e sistemas).

A eficácia do betão como proteção contra a corrosão das armaduras de aço é dependente de dois fatores igualmente importantes: as propriedades dos materiais, nomeadamente do betão e práticas de projeto e construção. Muitas excelentes fontes de informações disponíveis sobre o efeito da qualidade do betão para proteção contra corrosão podem ser encontradas nas normas da American Concrete Institute (Perenchio, Fraczek e Pfeifer; (1989) ACI 222R, ACI 201.2R)

(36).

Os Estados Unidos, devido a sua enorme costa marítima, têm enfrentado graves problemas com o ingresso de cloretos nas suas estruturas, dessa forma as normas do ACI são muito vastas sobre essa matéria. Estas normas surgem de forma a atender às exigências para as propriedades dos materiais, design e construção. As normas ACI 301 e ACI 318 fornecem orientações adicionais na forma de especificações padrão. A segunda categoria de medidas de proteção à corrosão envolve técnicas para prevenir a entrada de cloretos no betão. Estas incluem tratamentos, tais como as membranas impermeáveis, superposições e impregnação de polímeros

(36).

O artigo ACI 222R oferece um excelente tratamento deste assunto. A última categoria de medidas de proteção contra a corrosão envolve aspetos únicos em betão armado. Os itens a

serem considerados são a seleção de materiais de pré-esforço, do aço a aplicar, sistemas de proteção do betão pré-tensionado e pós-tensionado, e proteção catódica ⁽³⁶⁾.



Figura 62: Proteção catódica das armaduras contra a corrosão por cloretos ⁽⁴²⁾.

Se o betão ou argamassa ao redor do aço ou do cabo de pré-esforço está contaminado com cloretos, a proteção catódica pode ser aplicada para evitar a corrosão do aço. A proteção catódica consiste essencialmente na polarização catódica do aço em relação a um ânodo sacrificial. A polarização pode ser prevista pela diferença natural nos níveis de polarização entre dois materiais ou por corrente impressa. Isso força a corrosão do ânodo de sacrifício para proteger o cátodo. Dependendo do nível e extensão da corrosão, uma corrente impressa pode ser aplicada aos sistemas de polarização ⁽³⁶⁾.

Uma forma de evitar a deterioração das infraestruturas de betão armado é de equipá-las com proteção catódica. A título de exemplo, as sondas da marca CORROSOMETER[®] têm sido utilizadas com sucesso como sistema de proteção catódica, bem como de fornecerem uma peça de teste que pode ser eletricamente isolada para facilitar as medidas de proteção catódica, tais como, as taxas de polarização.

Em alguns casos, a proteção catódica não pode ser instalada, ou no caso de se encontrar instalada, não pode ser ligada, até que a corrosão se inicie como resultado da penetração de cloretos no betão. Quando a iniciação da proteção catódica é adiada após a construção inicial, é extremamente importante saber o momento de aplicação da proteção catódica. Posteriormente, é importante controlar a proteção catódica e assegurar que o aço está sendo totalmente protegido ⁽⁴⁰⁾.

3.9 - Reações expansivas internas.

A reação álcalis-agregado (RAA), cuja forma mais conhecida é a reação álcalis⁸⁴-sílica (RAS), e a reação sulfática interna (RSI), esta última com formação de etringite⁸⁵ retardada (DEF), englobam-se nas designadas reações expansivas internas, porque estão relacionadas com a formação de compostos expansivos a partir dos constituintes usados na fabricação do betão (fig. 63).

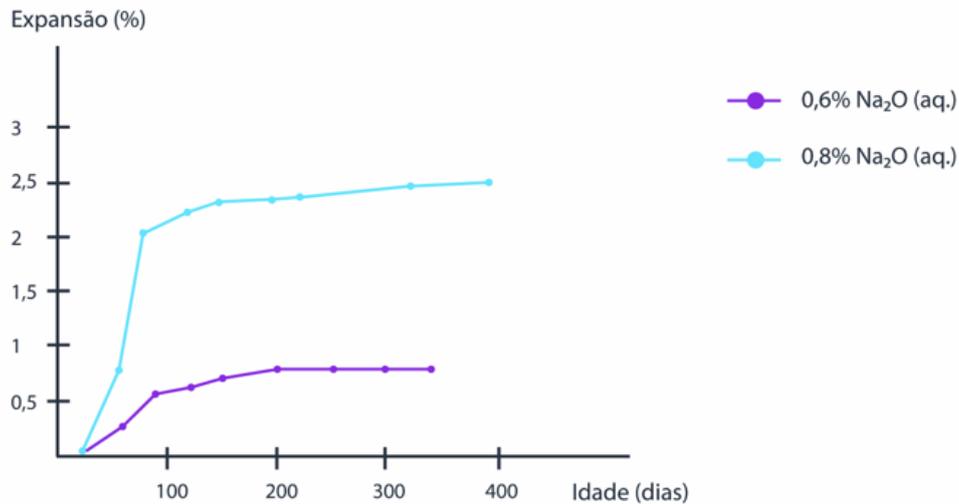


Figura 63: Influência do teor de álcalis do cimento na expansão de provetes de argamassa (adaptado) [43].

Estas reações provocam a fissuração do betão, contribuindo decisivamente para a diminuição da vida útil da estrutura, podendo em alguns casos obrigar à sua demolição. Associada a esta situação, acresce o fato de não se dispor atualmente de um método totalmente eficiente e econômico de combater esta forma de degradação.

Deste modo, para garantir os tempos de vida útil preconizados para as novas construções devem-se adotar medidas preventivas para evitar ou minimizar os efeitos da ocorrência deste tipo de reações expansivas nas estruturas de betão.

A ocorrência nos últimos anos em várias estruturas de betão deste tipo de reações expansivas, tanto internacionalmente como a nível nacional, potenciou a necessidade de se criarem essas medidas, não só para as estruturas afetadas, mas também para as novas estruturas. Uma das medidas de controle ou prevenção mais empregue é a do controle do ingresso de água no betão (fig. 64).

⁸⁴ Os álcalis são do ponto de vista químico, os elementos que se localizam na primeira coluna da tabela periódica, embora apenas o sódio e o potássio sejam considerados como álcalis na química do cimento⁽³⁵⁾.

⁸⁵ A etringite é o composto trissulfatoaluminato de cálcio hidratado de fórmula química $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$. Existem duas formas de etringite que se diferenciam pelo momento da sua cristalização. A etringite primária que se forma nas primeiras idades de hidratação do cimento, e que não constitui nenhum "perigo" para a estrutura dado que ela se desenvolve durante a fase fluida do betão. A etringite dita secundária é aquela a que está associado um efeito nocivo, desenvolve-se nos betões depois de endurecidos. Uma das formas de etringite secundária é a denominada de etringite retardada a qual está associada a betões que estiveram sujeitos a temperaturas elevadas durante o período de cura do betão. Esta etringite neoformada pode provocar a expansão e consequente desagregação do material (Santos Silva e Gonçalves, 2006).

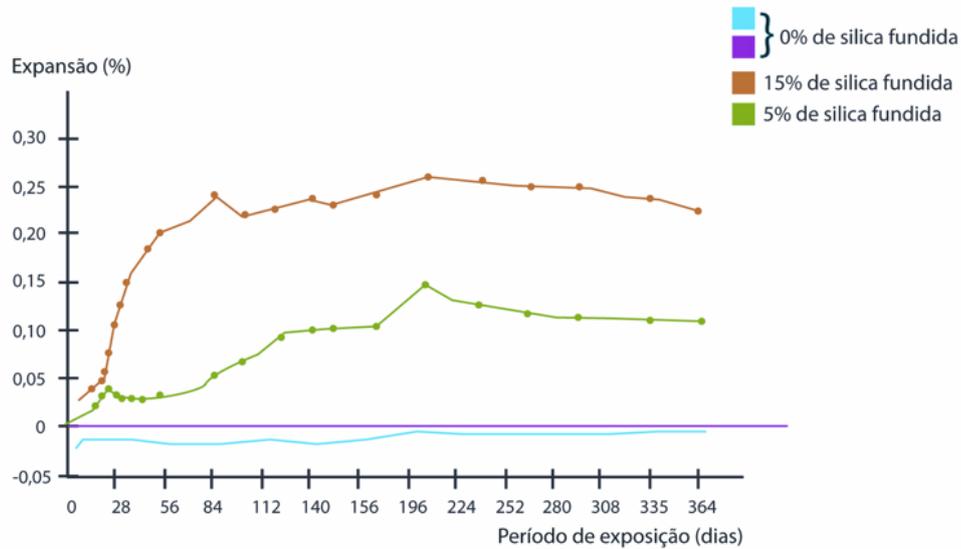


Figura 64: Expansão devida à RAS em prismas de betão ($75 \times 75 \times 300 \text{ mm}^3$) imersos em água, contendo diferentes quantidades de sílica (SiO_2) sintética amorfa (adaptado) [43].

Para, além disso, o uso do nitrato de lítio tem sido mencionado como um método alternativo na mitigação da RAS e também, e só muito recentemente, da DEF. De fato, uma quantidade considerável de literatura, começando com o trabalho clássico de McCoy e Caldwell (1951), sugere que compostos de lítio podem ser úteis na diminuição da expansão devida à RAS. Contudo em Portugal ainda não existem quaisquer estudos realizados sobre a utilização deste método de tratamento.

Classe de reatividade dos agregados	Dosagem (kg) de LiNO_3 (a 30%) por kg de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ no betão.
Classe II	3,75
Classe III	5,95

Tabela 14: Classes de reatividade dos agregados.

Em Portugal, as medidas preventivas destas reações expansivas internas estão contidas na Especificação LNEC E461, citada na “NP EN206-1 – Betão. Parte 1: Desempenho, especificação, produção e conformidade”, a qual inclui a fixação de níveis de prevenção de acordo com a categoria de risco e exposição ambiental do elemento ou das estruturas de betão. Estas medidas passam por uma caracterização dos fatores condicionantes destas reações nos constituintes do betão e pela aplicação de medidas para a sua inibição.

3.9.1 - Reações álcalis-agregado.

As reações álcalis-agregado (RAA) correspondem a uma designação atribuída a um grupo de reações químicas que ocorrem entre certos tipos de minerais dos agregados e dos iões alcalinos (sódio e potássio) e hidroxilos (OH^-) presentes na solução intersticial da pasta de cimento no betão. Estas reações, que incluem as reações álcalis-sílica (RAS), álcalis-silicato e

álcalis-carbonato (RAC), são de dissolução e ocorrem em resultado da grande solubilidade que as formas amorfas, desordenadas ou mal cristalizadas de sílica apresentam em soluções muito alcalinas. A reação origina um gel higroscópico alcalino que absorve água e que se expande, originando tensões internas no betão que acabam por provocar a sua fissuração (41).

O fenómeno conhecido como reação álcalis-sílica (RAS) foi primeiramente descrito por Stanton em 1940. A reação é expansiva e resulta em graves fissuras na estrutura. Destacamentos e exsudação de um fluido viscoso alcalino são as manifestações do fenómeno. No betão, as fissuras têm um padrão ligado e irregular, que tem sido referido como “map-cracking”. Em alguns casos, pode haver exsudações através das fissuras de um gel viscoso e incolor, que ao ficar exposto ao ar endurece e adquire a cor branca. O desenvolvimento da RAS, na medida em que as fendas tornam-se visíveis, exige um tempo considerável, geralmente de alguns anos (11).



Figura 65: Reparação da fissuração provocada por reações expansivas internas [44].

Essa fendilhação (com a sua peculiaridade de ser ligada e com um padrão irregular) pode em muito, ajudar a diferenciá-la de fissuras resultantes de efeitos físicos como retração por secagem. As manifestações visuais das reações álcali-carbonato parecem ser semelhantes às que envolvem a RAS (11).

O efeito das reações álcalis-agregado (RAA) foi observado pela primeira vez com alguns agregados canadianos, que também continham minerais de calcite e argila. Gillott e Swenson reviram as teorias do mecanismo de expansão, e concluíram que a expansão se deveu a absorção de água pelos minerais de argila, que foram expostas como um resultado da reação de desdolomitização. Em contraste, Tang et al. concluíram num estudo com a utilização do STEM, que os minerais de argila estão presentes no material de matriz do agregado e não como inclusões na dolomite, e que a expansão foi causada principalmente pelo crescimento dos cristais de brucite em torno das superfícies dos grãos de dolomite, os minerais de argila, “criam” os caminhos através dos quais a solução alcalina poderá penetrar (32).

As reações destrutivas associadas à desdolomitização também foram observadas com agregados dolomíticos no Bahrein, neste caso, possivelmente dificultado pela presença também

de gesso. Van Aardt e Visser mostraram que podem ocorrer reações com feldspatos para dar origem a aluminato tetracálcico (C4AHX), álcalis e outros produtos, e que o C4AHX poderia reagir com o sulfato de cálcio (CaSO_4) para formar etringite. Eles concluíram que algumas rochas feldspáticas, tais como grauvaques e alguns xistos e arenitos, poderiam ser suspeitas no que diz respeito à reatividade na pasta de cimento. Way e Cole confirmaram a ocorrência de reações com feldspato, mas não encontraram nenhuma evidência de reações deletérias com agregados de granito ou basalto ⁽³²⁾.

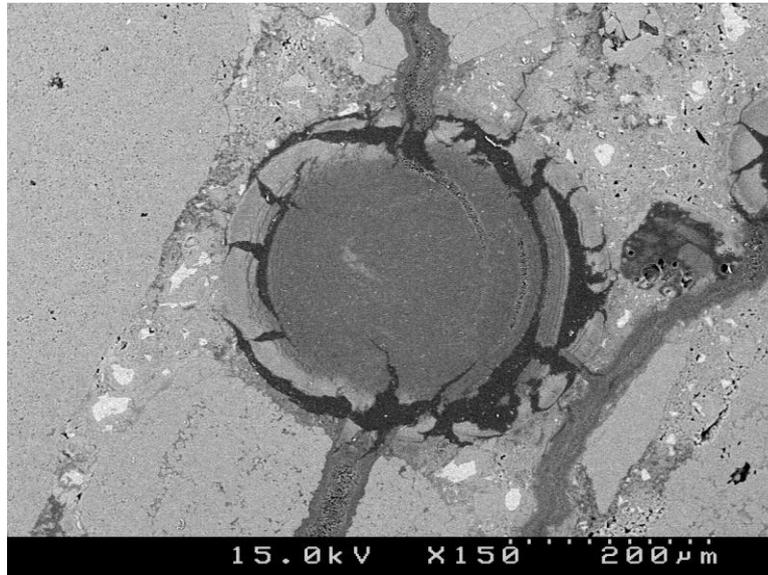


Figura 66: Imagem ao microscópio eletrónico de varrimento de um produto da RAA(cristal de etringite) ^[45].

Resultados laboratoriais e de campo nos Estados Unidos têm demonstrado que os cimentos Portland contendo mais de 0,6% de óxido de sódio(Na_2O), quando utilizados em combinação com um agregado reativo aos álcalis, pode causar expansões devido à RAA. Com betões em que existe uma quantidade muito elevada de cimento, uma quantidade inferior a 0,6% de álcalis no cimento pode ser nociva. Em relação aos agregados reativos aos álcalis, e dependendo do tempo, temperatura e tamanho das partículas, que incluem todos os silicatos ou minerais de sílica, bem como a sílica hidratada (opala) ou a forma amorfa (obsidiana ou vidro de sílica), podem reagir com soluções alcalinas, embora a maior parte dos minerais reajam apenas a um nível insignificante. Uma lista exaustiva das substâncias responsáveis pela deterioração do betão por RAA foi apresentada por Eglinton, M. S., no seu artigo intitulado “Concrete and Chemical Behaviour, (Telford, London, 1987)”.

Para o caso da utilização de agregados reciclados a Especificação LNEC E471, classifica os agregados reciclados grossos abrangidos pela norma NP EN 12620 e estabelece os requisitos mínimos que deverão respeitar para poderem ser utilizados em Portugal na fabricação de betões de ligantes hidráulicos. Os agregados reciclados contemplados por esta Especificação provêm de resíduos de obras de construção, reconstrução, ampliação, alteração, conservação e da demolição de edificações. O domínio de aplicação dessa Especificação exclui os resíduos reciclados de misturas betuminosas. A utilização de agregados reciclados em camadas não ligadas de pavimentos é contemplada na Especificação LNEC E473 ⁽⁴²⁾.

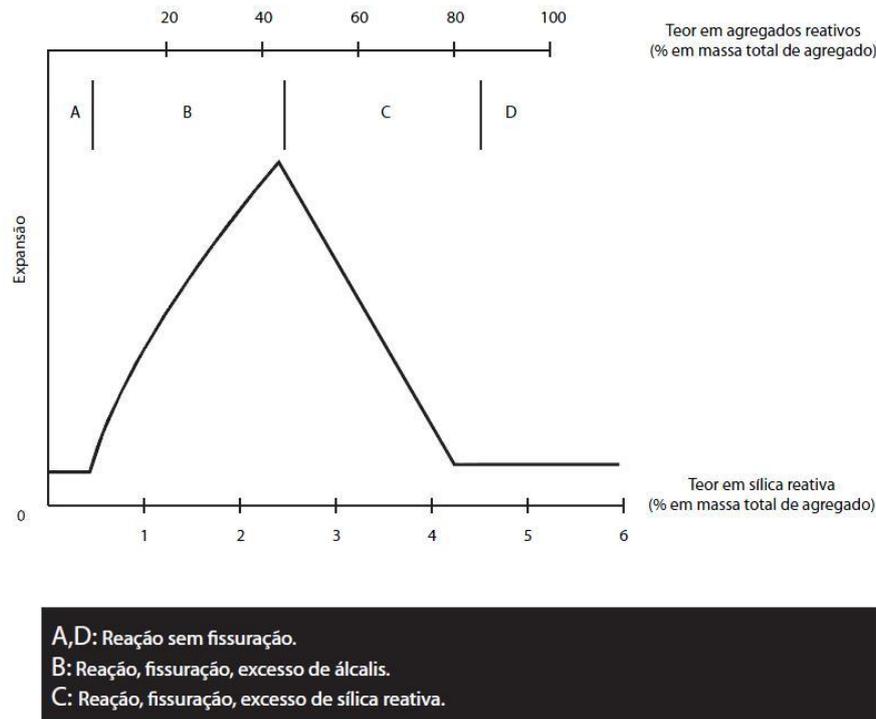


Figura 67: Diagrama esquemático do comportamento péssimo de uma argamassa com teor de álcalis de 6 kg/m^3 e razões água/cimento e agregado/cimento de 0,4 e 2,75, respectivamente (adaptado) [46].

De acordo com a norma BS 8500-2⁸⁶ e em publicações do WRAP⁸⁷, os agregados reciclados são considerados como potencialmente reativos. No entanto, estudos recentes⁸⁸ revelaram que, com exceção de agregados reciclados resultantes da regularização de pavimentos, os agregados reciclados poderiam ser considerados como não reativos, mesmo quando provenientes de betões fabricados com agregados reativos (42).

Enquanto não se dispuser de mais informação sobre o comportamento dos agregados reciclados no que se refere a esta reação expansiva, entendeu-se ser conveniente manter a avaliação da reatividade dos agregados reciclados à semelhança do estabelecido para os agregados abrangidos pela Especificação LNEC E461 (42).

Dependendo do grau de desordem no agregado estrutural, da sua porosidade e do tamanho da partícula, o gel RAS terá composição química variável. O modo de ataque no betão envolve a repartição da sílica dos agregados estruturais pelos iões hidroxilo, seguido da adsorção dos iões de metal alcalino recém-criados na superfície dos produtos de reação. Quando este gel RAS entra em contato com a água, elas incham por absorverem uma grande quantidade de água por osmose. A pressão hidráulica desenvolvida pode levar a uma expansão e fissuras nas partículas de agregado afetadas, na pasta de cimento ao redor dos agregados, e no betão (11).

⁸⁶Concrete.Complementary British Standard to BS EN 06-1.Specification for constituent materials and concrete”.British standards Institution.

⁸⁷ Collins, R. J. et al “Improving Specifications for Use of Recycled and Secondary Aggregates in Construction”. DTI/WRAP Aggregates Research Programme STBF 13/6C. The Waste and Resources Action Programme, UK, June 2004.

⁸⁸ Dhir, R.K. et al. “ASR Guidance on Recycled Aggregates – Guidance on Alkali Limits and Reactivity”. DTI/WRAP Aggregates Research Programme STBF 13/14C. The Waste and Resources Action Programme, UK, May 2005.

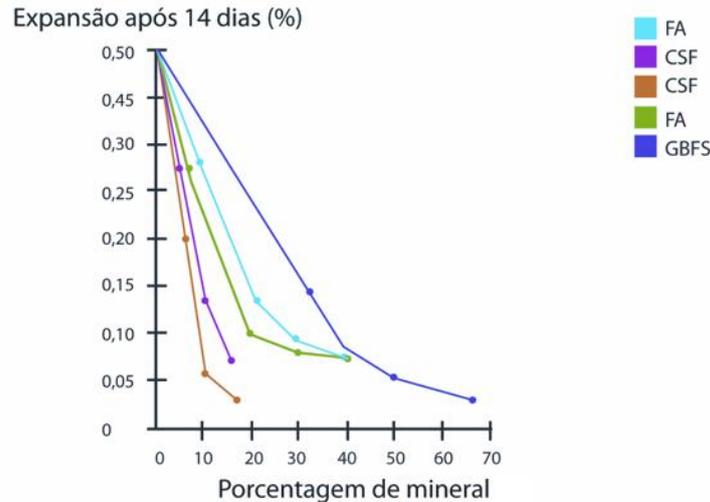


Figura 68: Efeito do tipo de adição na expansão devida à RAA de um agregado reativo riolítico. Notação: sílica de fumo (CSF); cinzas volantes (FA); e escória granulada de alto-forno (GBFS) (adaptado) [43].

No entanto, independentemente dos agregados utilizados serem ou não reciclados, as RAA são poucas vezes referidas como a causa primária do colapso ou da necessidade de demolição total de uma estrutura. No entanto, esta contribui, quando presente, para uma diminuição da durabilidade do betão (fig. 68).

Estudos detalhados mostraram que há um número de diferentes materiais que produzem as interações químicas no betão. Uma delas é a reação álcali-carbonato (RAC), o que é bastante diferente da reação álcali-sílica e foi primeiramente descrita por Swenson⁸⁹ em 1957. Ele descreveu seções de pavimento de Betão, em Kingston, Ontário, que apresentavam uma expansão excessiva que fechou as juntas de dilatação e produzam fissuras nas lajes no prazo de 6 meses após a sua conclusão. As fissuras definidas formavam hexagonais com aproximadamente 50-100 mm de largura e se estenderam profundamente no betão. Uma vez que estas primeiras observações, muitos outros casos de reações álcali-carbonato em betões, têm sido detectadas em muitas partes do mundo (43).

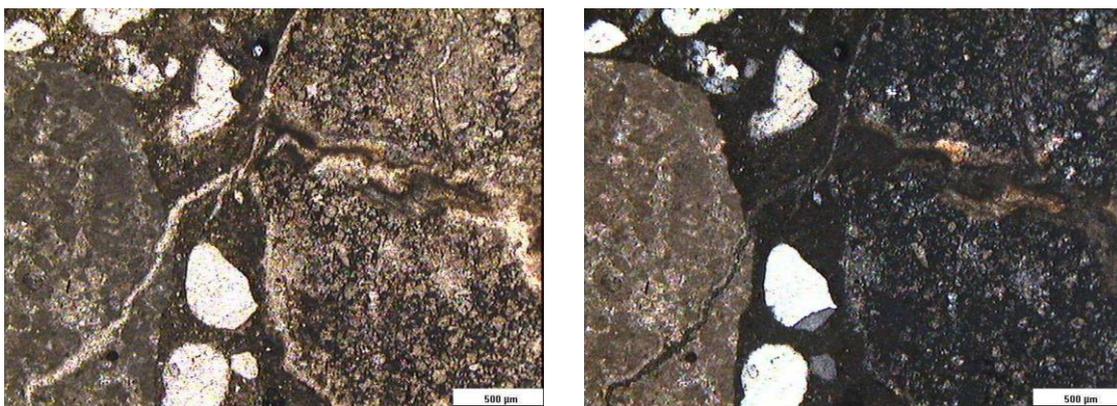


Figura 69: Observação ao microscópio petrográfico de lâminas delgadas de betão que mostram a micro fissuração por gel da RAA: (esquerda) imagens com polarizadores paralelos e (direita) cruzados [43].

⁸⁹J.E. Gillott, M.A.G., Duncan and E.G. Swenson; Alkali-aggregate reaction in nova Scotia IV.Character of the reaction(2003).

Vários tipos de RAC também têm sido relatados, embora nem todos eles pareçam ser expansivos ou deletérios. Elas podem ser classificadas nos seguintes grupos, principalmente de acordo com o tipo de reação ou produtos de reação que elas produzem ⁽⁴³⁾:

- Reações de carbonato com calcários calcíticos. Devido à reação, bordas negras desenvolvem-se dentro da margem de agregação das partículas de calcário. Esses anéis são mais solúveis em ácido clorídrico do que o interior da partícula.
- Reações envolvendo agregados de calcário dolomítico caracterizados por bordas distintas da reação dentro do agregado. Condicionamentos com ácido clorídrico mostram que ambas as zonas de borda e no interior das partículas se dissolvem na mesma taxa.
- Reações envolvendo agregados de calcário dolomítico finos que contém calcite intersticial e argila. A reação com álcalis produz um anel desdolomitizado distinto. As partículas quando diluídas em ácido clorídrico reagiram, mostrando claramente uma borda de reação, que na maioria dos casos notificados é enriquecido em sílica.

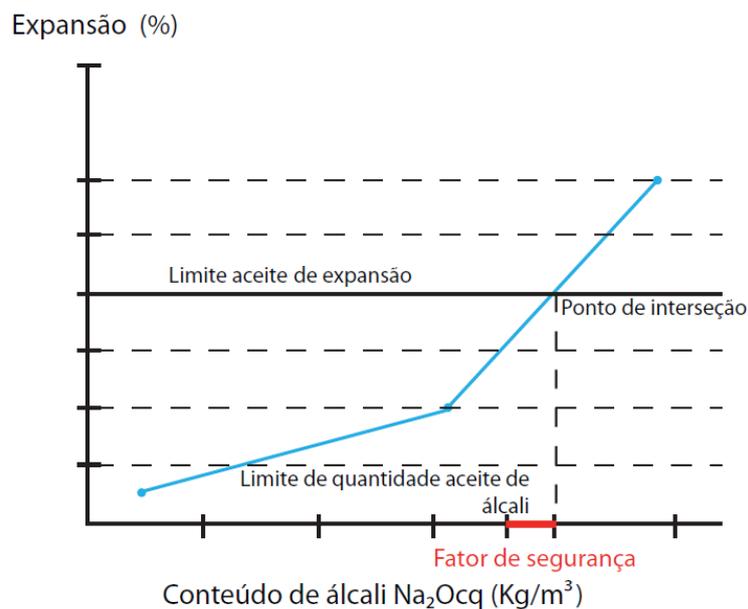
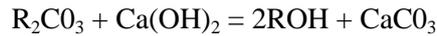


Figura 70: Ilustração do modo de calcular o teor limite de álcalis para um dado tipo de agregado (adaptado) ⁽⁴³⁾.

O terceiro tipo de reação parece ser a única a produzir expansão significativa. A causa não é bem compreendida no presente, mas Gillott⁹⁰ sugeriu que a dedolomitização dos cristais nas partículas de agregado abrem canais, permitindo que a humidade seja absorvida em superfícies de argila previamente seca. O “inchaço” causado por essa absorção causa a expansão irreversível dos agregados e subsequentemente à expansão e fissuração do betão. O processo da reação é essencialmente o de desdolomitização, juntamente com a produção de brucita (Mg(OH)₂), e regeneração de hidróxidos alcalinos, que se acredita proceder em duas etapas, que podem ser expressas pelas seguintes equações ⁽⁴³⁾:



⁹⁰Jagus, P.J. and Bawa, N.S. Alkali-aggregate reaction in concrete construction. *Road Research Bulletin* 3,(1957) 41–73 pp.



Onde o R pode representar potássio, sódio ou lítio.

Desta forma, podem-se então considerar existência de três tipos distintos de RAA (41):

- Reações álcalis-sílica (RAS);
- Reações álcalis-carbonato (RAC);
- Reações álcalis-silicato.

A reação álcalis-silicato, também conhecida por reação álcalis-sílica de expansão lenta e retardada, é semelhante à RAS (pois normalmente nas rochas contendo filossilicatos existe quartzo micro cristalino), exceto no fato de que, neste caso, o constituinte reativo do agregado não é a sílica livre, mas a sílica presente como constituinte em sistemas siliciosos polifásicos (ex.: granitos, xistos, grauvaques⁹¹)(41).



Figura 71: Pormenor dos efeitos da reação álcalis-agregado no betão fissuras em rede e destacamento, Biblioteca Nacional de Brasília, Brasil.

É aceite, no entanto que, no geral, o mecanismo da reação expansiva seja análogo ao da reação álcalis-sílica, existindo possivelmente algumas diferenças no comportamento químico e físico dos géis e outros produtos de reação formados (41).

A expansão devido à RAA (dependendo da sua intensidade e da pressão interna provocada) pode ter um efeito muito severo para a estrutura de betão, enfraquecendo a estrutura da pasta cimentícia como uma extensão que chega a deixar as armaduras expostas. As manifestações macroscópicas das RAA incluem a presença de fissuração tipo “map-cracking”, fechamento de juntas de dilatação, expansões e deslocamentos de partes da estrutura. A

⁹¹ Rocha sedimentar de cores cinza a esverdeada devido aos minerais máficos e fragmentos de rocha quea compõe. O elemento característico do grauvaque é a matriz de granulometria fina, formada pelo intercrescimento de clorite e sericite e grãos do tamanho de silte de quartzo e feldspato(32).

exsudação de gel e fragmentos desprendidos (pop-outs) são outros fenómenos relacionados com as RAA ⁽¹⁷⁾.

As RAA dependem da presença no betão de quantidade suficiente de álcalis, sílica potencialmente reativa e de quantidade suficiente de água. Apenas na presença destes três fatores ocorre a RAA. A principal contribuição de álcalis para o betão ocorre através do cimento introduzido, embora existam outras fontes externas de álcalis, incluindo por vezes algumas percentagens de álcalis do próprio agregado ⁽⁴⁴⁾.

As quantidades de álcalis introduzidos no betão podem ser limitadas, criando assim uma barreira à formação da RAA. O desenvolvimento da reação, neste caso, surge a partir de um fornecimento extra de álcalis pelo ambiente ao betão. As águas do subsolo, que são ricas em sulfatos, e que podem contribuir com álcalis para o betão. Esse problema ocorre principalmente onde o nível de sulfatos das águas do subsolo é elevado, sugerindo a necessidade de existir uma proteção do betão nessas áreas para evitar as RAA ou os ataques por sulfatos ⁽⁴⁴⁾.



Figura 72: Fatores que promovem a RAS(adaptado) ⁽⁴⁷⁾.

Em diversos países, onde os invernos são severos, o cloreto de sódio é utilizado como sal anti-congelante, tornando-se assim numa fonte de álcalis para o betão. O sal seco, transportado pelo vento, irá depositar-se na superfície das estruturas de betão. A absorção no betão dá-se com a condensação da água à noite, especialmente se o betão for bastante permeável. Também as exposições do betão à água do mar, principalmente em zona de marés criando ciclos de molhagem e secagem, podem contribuir com álcalis para o betão ⁽⁴⁴⁾.

A título de exemplo, alguns estudos realizados no Canadá, verificaram que a exposição ao cloreto de sódio não cria expansões se o betão tiver um baixo conteúdo em álcalis. A mobilidade dos iões sódio e potássio na pasta depende diretamente da humidade existente. Assim, o movimento da água no betão irá transportar os iões, retirando estes de determinadas zonas e concentrando-os em outras ⁽⁴⁴⁾.

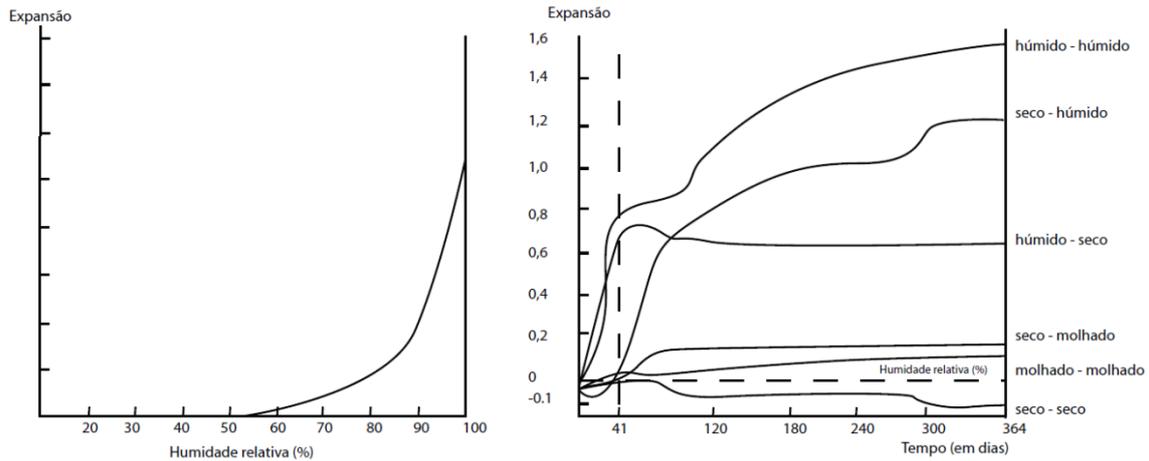


Figura 73: Efeito da humidade relativa na expansão do betão devida à RAS (esquerda), e efeito da humidade e da água na expansão de argamassas afetadas por RAS. A transição de ambiente ocorreu aos 41 dias (direita) (adaptado) [43].

A evaporação da água de uma dada superfície do betão, enquanto que, outra se encontra em contato com uma elevada percentagem de humidade, pode promover dessa forma a concentração de álcalis na zona de secagem. Comparativamente, os sais que se depositam na superfície seca exposta são introduzidos no betão quando esta se encontrar molhada, podendo os álcalis ser lixiviados da superfície do betão que está frequentemente molhada (44).

O mecanismo da RAS está dependente da presença das condições que favorecem a formação do gel de sílica. Este gel tem características hidrofílicas, o que significa que, se houver humidade suficiente na estrutura porosa do betão este gel irá expandir com aumento de volume, o que causará o destacamento de partes do betão (fig. 73), dano que será perfeitamente visível na superfície da estrutura (17).

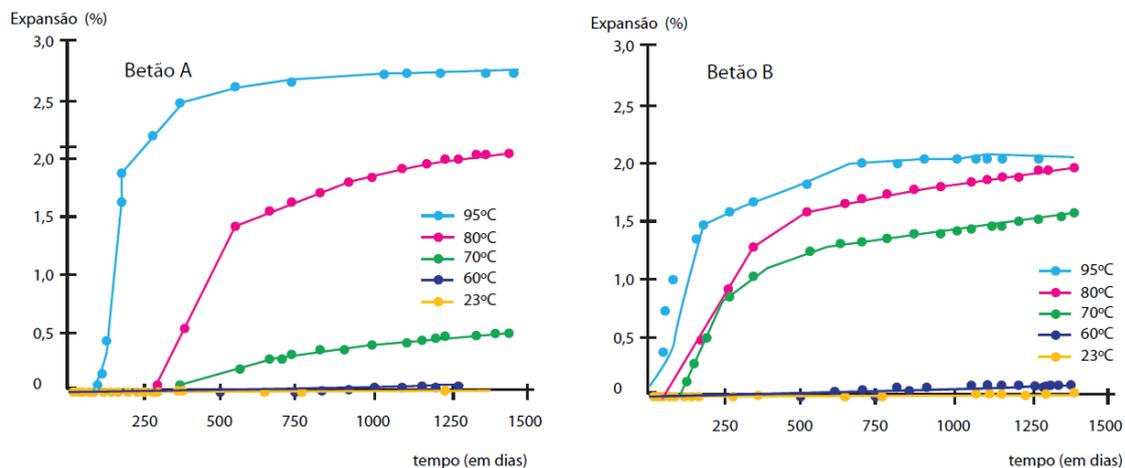
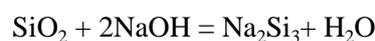
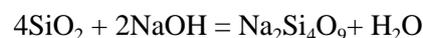


Figura 74: Efeito do aumento da temperatura na cinética da expansão devida à RAS em argamassas de cimento Portland tipo III (adaptado) [43].

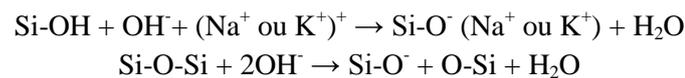
A reação ocorre de acordo as equações (43):



No entanto, a composição química do gel RAS é variável e indeterminado. Além disso, alguns estudos e pesquisas de entre os quais se destaca o trabalho de Vivian⁹², entre outros, indicam que é a concentração de hidróxido(OH⁻) que é importante para esta reação e que o cátion do metal alcalino é relevante apenas na medida em que se torna incorporado no gel (43).

A velocidade e a expansão devida à RAS dependem da temperatura do meio ambiente, isso poderá tornar o gel mais fluido, fazendo com que ele se possa deslocar para o exterior através de fissuras, impedindo desta forma qualquer nova expansão. Em temperaturas mais baixas, enquanto a reação e a expansão ocorrem mais lentamente, o gel vai eventualmente produzir expansões maiores do que alcançaria a uma temperatura mais elevada. Este motivo justifica o porquê de estruturas sujeitas a ambientes mais frios apresentarem grandes expansões (17).

A velocidade do ataque dependerá da concentração dos hidróxidos alcalinos na solução intersticial e da estrutura da sílica. O quartzo “bem cristalizado” é geralmente considerado não reativo em solução alcalina. De fato, quando grãos de quartzo são colocados na solução intersticial do betão, o ataque pelos hidróxidos alcalinos ocorre essencialmente à sua superfície de acordo com as equações (41):



A velocidade de penetração dos hidróxidos alcalinos na estrutura bem cristalizada do quartzo é baixa devido à sua pequena área superficial interna, enquanto no quartzo criptocristalino já é maior devido ao aumento da área superficial (fig. 75). O mesmo comportamento é observado em grãos de grandes dimensões de quartzo que tenham defeitos ou estejam deformados. Esta situação sugere que nenhum agregado silicioso possa ser considerado à partida “inerte” no que se refere à RAS (41).

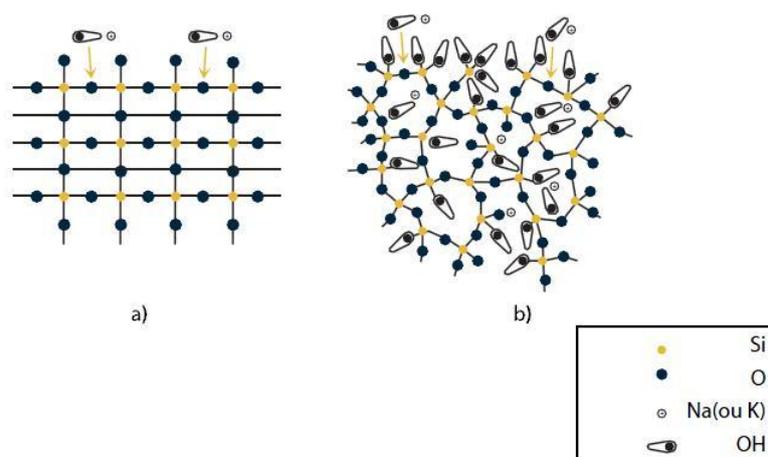


Figura 75: Representação esquemática do ataque dos álcalis à sílica bem cristalizada (a) e mal cristalizada (b) (adaptado)^[48].

⁹²Mullick, A.K., Samuel, G. and Ghosh, S.N. Identification of reactive concrete aggregates containing strained quartz by SEM and IR. *Proceedings of the Seventh International Conference on Cement Microscopy, Fort Worth, TX, (1985)* pp. 316–332.

As proporções adequadas relativas dos componentes reativos de álcalis nos fluidos dos poros e materiais siliciosos reativos nas partículas de agregado, juntamente com humidade suficiente para se dar o processo, são requisitos essenciais para a iniciação e a progressão da RAS no betão. A composição do gel depende, em parte, da natureza exata e das proporções dos reagentes, mas as pressões devido à expansão, que se desenvolvem com o absorver de água, são apenas parcialmente dependentes da sua composição. Tanto a temperatura e a taxa de migração dos fluidos dos poros para o local da reação, são tidas como fatores importantes que dizem respeito às pressões devidas à expansão e, portanto, da ruptura do betão (43).

Há diversas formas de evitar a RAS e os danos a ela associados. O primeiro método (e mais importante) é o de se utilizar, sempre que possível, um agregado com um bom registro de serviço, agregado que deverá ter uma baixa reatividade aos álcalis. Outro método é o de utilizar um cimento Portland com baixo teor de álcalis (17).

Uma vez que os cimentos com baixo teor de álcalis nem sempre estão facilmente disponíveis, as adições minerais podem ser usadas em combinação com o tipo de cimento local para que assim se possa reduzir a probabilidade de ocorrência de RAS. Cinzas volantes, escória granulada de alto-forno, sílica de fumo e pozolanas são exemplos de adições que permitem baixar a alcalinidade do ligante (Kosmatka, 2002). A influência de diferentes quantidades destes aditivos é mostrada na figura seguinte (17):

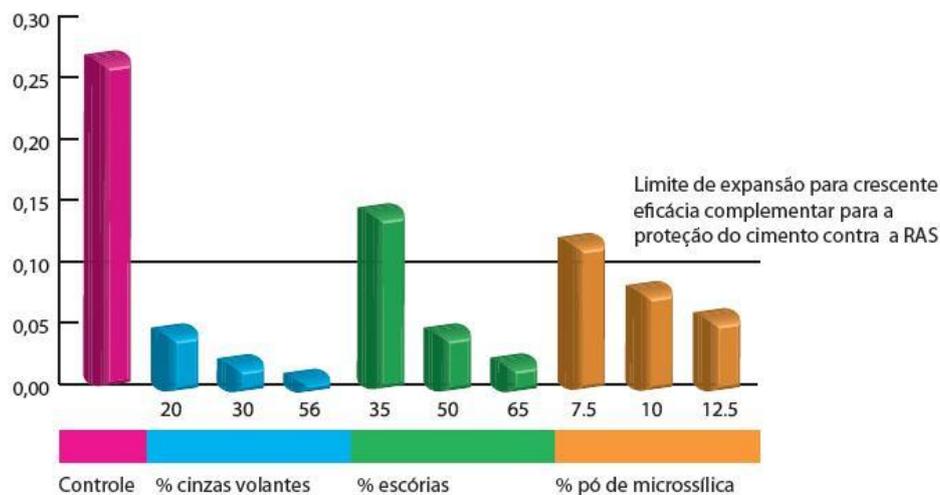


Figura 76: Influência de diferentes quantidades de cinzas volantes, escórias e sílica de fumo (microsílica) em substituição de cimento na expansão de argamassas (ASTM 1260)(adaptado) (49).

O lítio pode igualmente ser usado para reduzir a expansão no betão devido à RAS (FHWA, 2002). Desta forma o nitrato de lítio (LiNO_3) tem sido o aditivo mais utilizado na redução da expansão devido à RAS (Collins, et al, 2004). Este composto permite que o fabricante do betão possa utilizar agregados locais, que eventualmente possuam um teor de sílica reativa acima do pretendido, sendo um método mais fácil, rápido e barato do que, por exemplo, o transporte de longas distâncias de agregados não reativos (17).

Para estruturas de betão já construídas, em alguns casos após algumas décadas, um método que permite prevenir ou reduzir os danos da RAS é a manutenção da estrutura de betão num “estado” relativamente seco. É muito importante que a estrutura não seja exposta à água

parada, ou empoçada. Dado que a RAS é amplificada quando existe uma grande quantidade de humidade na estrutura porosa do betão, mantendo o betão livre da humidade persistente isso permitirá evitar danos provocados pela RAS ⁽¹⁷⁾.

A RAC, que é uma reação que envolve a reação dos iões hidroxilos e alcalinos com certos dolomitos argilosos⁹³, é explicada por uma desdolomitização, ou seja, uma decomposição do carbonato duplo de cálcio e magnésio no meio alcalino da solução do betão ⁽⁴¹⁾:

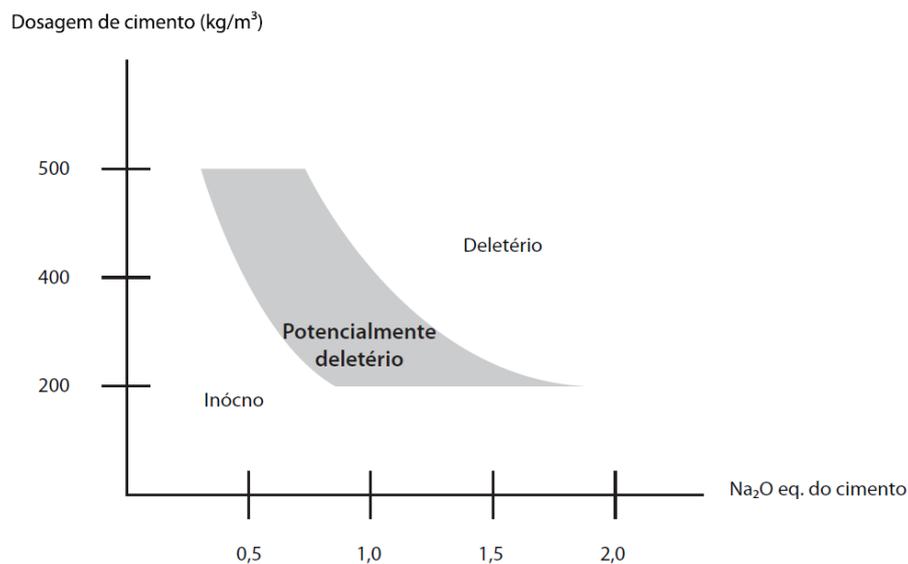
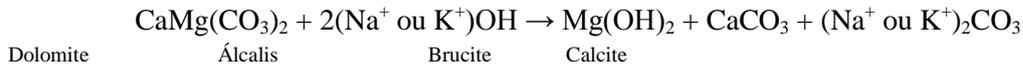


Figura 77: Relação entre o teor de álcalis ativos do cimento e a dosagem de cimento no betão, e o resultante potencial para a RAS (adaptado) ^[43].

A cristalização da brucita pode causar danos relacionados com a expansão (Kosmatka, 2002). A melhor maneira de prevenir a RAC, tal como a RAS, é escolher cuidadosamente os agregados (principalmente no caso de estes serem oriundos de uma pedreira que é conhecida por produzir agregados minimamente reativos). Um estudo petrográfico pode determinar se o agregado é suscetível a RAC. A RAC não ocorre com frequência, uma vez que o agregado dolomítico normalmente não é adequado para uso como agregado ⁽¹⁷⁾.

A expansão (que se processa de forma muito rápida e com intensa fissuração ao fim de menos de 5 anos), pensa-se que, esteja relacionada com a desdolomitização, essencialmente em resultado da absorção de água pelos minerais argilosos que ficam expostos no decorrer do processo. A ocorrência de casos de degradação do betão por RAC, não é internacionalmente muito frequente, em Portugal apenas se conhece um caso em que se detectou um processo de desdolomitização associado a um ataque por sulfatos ⁽⁴¹⁾.

Uma inspeção visual da estrutura poderá revelar danos que possam ser atribuídos à RAS. De forma a diagnosticar a presença de RAS devem ser extraídas amostras (carotes) da estrutura afetada, de zonas fissuradas e não fissuradas. Dois principais métodos de ensaio são

⁹³ Os dolomitos são rochas sedimentares (superior a 50% de carbonatos), em que o carbonato duplo de cálcio e magnésio (dolomite) entra em quantidade superior à do carbonato de cálcio.

utilizados. Um deles é o método microscópico, que envolve a utilização de um microscópio óptico ou, um microscópio eletrônico de varrimento. Este método deve ser efetuado por técnicos com experiência em microscopia de betão (17).

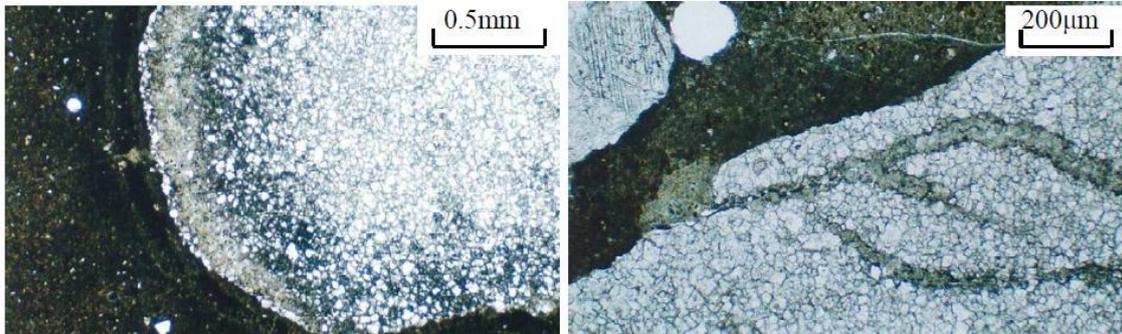


Figura 78: Observação ao microscópio petrográfico de lâminas delgadas de betão, evidenciando o processo de desdolomitização através da ocorrência de orlas de alteração e de fissuras num agregado dolomítico [43].

Outro método que tem sido utilizado, embora esteja já em desuso, é o método do acetato de urânio. Este produto químico é aplicado na superfície do betão, neste processo o ião urânio, com uma carga +2, é atraído para o gel de sílica, que tem uma carga negativa. Sob luz ultravioleta o ião urânio irá apresentar com uma cor amarela ou verde fluorescente. Este método não é desejável por várias razões (17):

- Representar um perigo, dado que o ião urânio é um composto radioativo;
- Ao usar a luz ultravioleta, isso faz com que seja difícil ver características do betão em análise.
- É possível que o acetato de urânio reaja com outras superfícies carregadas negativamente, dando informações falsas (Guthrie, 1997).



Figura 79: Fenda no betão provocada pela RAS [50].

Em Portugal, têm sido identificados segundo o relatório CR1901 (1995), poucos casos de estruturas com degradação do betão devido às RAS. Os casos mais mediáticos são

correspondentes a algumas barragens antigas e pontes. Foram ainda identificados casos de RAS em alguns depósitos de água situados no centro de Lisboa (Pereira e Santos Silva, 1997; Santos Silva, 2006) ⁽⁴⁴⁾.

Em 1992 Silva desenvolveu um trabalho, onde o autor fez um zoneamento do país baseado na existência de sílica potencialmente reativa nas rochas e na percentagem da área ocupada por essas rochas. Nesse trabalho o autor referiu que a maior contribuição de álcalis provém de rochas da família dos granitos, assim ele concluiu que existe em Portugal uma maior concentração de rochas potencialmente fornecedoras de álcalis nas regiões do Minho, Douro Litoral, Beira Alta e Baixo Alentejo (Fernandes, 2005; Santos Silva, 2006) a sílica potencialmente reativa se encontra principalmente no quartzo deformado associado a granitos, granodioritos, quartzitos, gnaisses e metapelitos ⁽⁴⁴⁾.

No entanto e apesar disso, Portugal apresenta um clima temperado influenciado pela presença marítima, pelo que isso não oferece condições muito favoráveis ao desenvolvimento da RAS em estruturas aéreas, quando em comparação com os climas dos países do Norte da Europa. De qualquer modo, existe algum contraste climático entre o litoral, o interior, o Norte e o Sul do país. A pluviosidade mais elevada e a maior concentração de estruturas hidroelétricas a Norte do país e a densidade populacional mais elevada do litoral, aumentando o número de estruturas de betão, indicam a maior probabilidade de ocorrência da RAS devido a fatores climáticos na zona Norte e litoral de Portugal (Santos Silva, 2001; Santos Silva, 2006) ⁽⁴⁴⁾.

3.9.2 - Reações sulfáticas internas.

Deste que se começou a estudar os danos existentes nas estruturas de betão, que se conhece a degradação provocada pelos sulfatos, dos quais se destacam as degradações provocadas pelos meios salinos⁹⁴. Assim, poderia pensar-se que este tipo de patologia, em particular no betão, estaria a ser controlada graças a uma adequada seleção dos materiais, entre os quais, nomeadamente, o tipo de cimento a utilizar na execução da estrutura.

No entanto, estruturas e peças de betão ainda são afetadas por uma atividade sulfática, cuja origem é por vezes atribuída aos constituintes usados na fabricação do próprio betão. Esta patologia é por isso denominada por reação sulfática de origem interna, visto que esta tem origem no interior da estrutura de betão. Ao contrário do que ocorre com as reações sulfáticas “clássicas” (RSE), onde os sulfatos atacam o betão a partir do exterior (provocando assim, uma degradação progressiva desde a superfície para o interior da peça de betão), a reação sulfática de origem interna irá afetar o conjunto do betão sem ter a necessidade de uma fonte externa de sulfatos (tal como ocorre na RSE) ⁽⁴¹⁾.

⁹⁴ Em média, a água do mar de todo o mundo tem uma salinidade de 35 (3,5% em massa, se considerarmos apenas os sais dissolvidos, mas a salinidade não tem unidades, o que significa que, para cada litro de água do mar há 35 gramas de sais dissolvidos, a maior parte é cloreto de sódio, NaCl). A água do mar não tem salinidade uniforme ao redor do globo. A água menos salina do planeta é a do Golfo da Finlândia, no Mar Báltico. O mar mais salino é o Mar Morto, no Médio Oriente, onde o calor aumenta a taxa de evaporação na superfície e há pouca descarga fluvial.

Com o efeito direto dessa reação, irá ocorrer a expansão do material, originando assim, a nível macroscópico a fissuração da estrutura. A origem da expansão é atribuída à formação de etringite secundária que apresenta, sob certas condições termodinâmicas, propriedades expansivas ⁽⁴¹⁾.



Figura 80: As diferentes fontes de sulfatos para o betão (adaptado)^[43].

A formação da etringite é considerada a causa da maior parte da expansão e rompimento das estruturas de betão, formação essa que está envolvida com o ataque por sulfatos⁹⁵. No entanto, não é necessariamente qualquer ataque de sulfatos que será causado pela formação de etringite⁹⁶. Além disso, a formação da etringite pode ocorrer sem implicar qualquer ataque de sulfatos ⁽⁴⁵⁾.



Figura 81: Representação da formação da etringite relacionada com a RSE (adaptado) ^[51].

O termo "ataque por sulfatos" significa toda a deterioração do betão que envolva qualquer tipo de interação com sulfatos na pasta de cimento, independentemente da temperatura

⁹⁵ACI Committee 201. Guide to durable concrete. ACI manual of concrete practice Part 1. Detroit, Mich., 1994.

⁹⁶Mehta PK. Sulfate attack on concrete – A critical review. In: Materials science of concrete III. American Ceramic Society; 1993. p. 105–30.

de cura e da fonte de sulfatos. Também existem danos que são especificamente atribuídos ao sulfato de cristalização, tais como de sais de sulfato solúveis em água⁹⁷ (45).

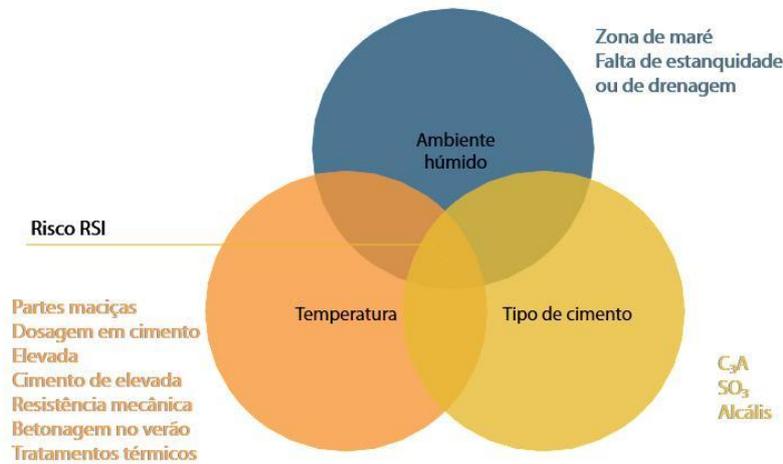


Figura 82: Fatores que promovem as Reações Sulfáticas Internas (adaptado)^[47].

A formação da etringite, tal como dito anteriormente, está associada à expansão e muitas hipóteses de expansão relacionadas à etringite foram introduzidas no meio científico⁹⁸. No entanto, a expansão da etringite não produz necessariamente perturbações prejudiciais às estruturas de betão. Quando a etringite ocorre de forma homogênea e imediata (dentro de horas), não causa qualquer ação localizada ou rupturas significativas (45).

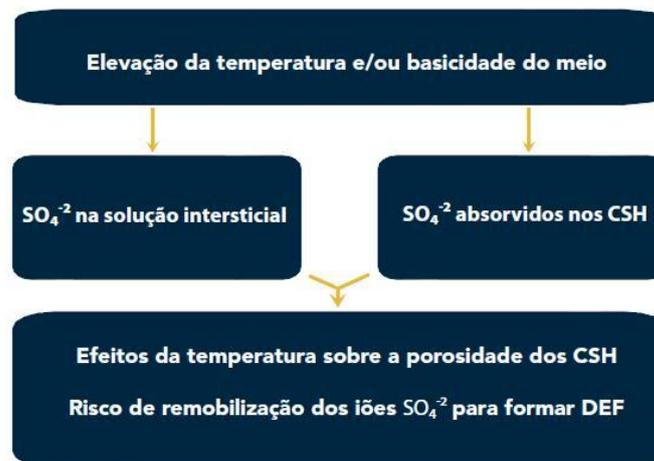
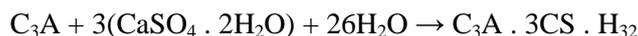


Figura 83: Mecanismos reacionais da etringite retardada (DEF)(adaptado) ^[43].

Este tipo de formação da etringite é inofensivo e acontece, por exemplo, quando o gesso reage com aluminato de cálcio anidro em uma reação por meio de uma solução e funciona como um retardador, conforme a seguinte equação o demonstra (45):

⁹⁷Haynes H, O'Neil R, Mehta PK. Concrete deterioration from physical attack by salts. Concrete Int 1996;18(1):63–8.

⁹⁸Mehta PK. Sulfate attack on concrete—a critical review. In: Materials science of concrete III. American Ceramic Society; 1993.p. 105–30, Taylor HFW. Cement chemistry. 2nd ed. London: Thomas Telford Publishing; 1997. p. 459 e Lawrence CD. Physicochemical and mechanical properties of Portland cements. In: Hewlett PC, editor. Lea's chemistry of cement and concrete. 4th ed. Arnold Publisher; 1998.p. 343–419.



A formação inicial de etringite, não provoca a expansão do betão, podendo ocorrer tanto em betões de cimentos resistentes aos sulfatos, como em betões de cimentos com escórias, sendo que nestes casos não ocorre expansão mesmo em contato com fontes externas de sulfato. Assim sendo, uma das fontes internas da formação de etringite, pode ter origem na remobilização dos sulfatos inicialmente contidos na matriz cimentícia, devido a um aquecimento excessivo do betão nas primeiras idades (41).

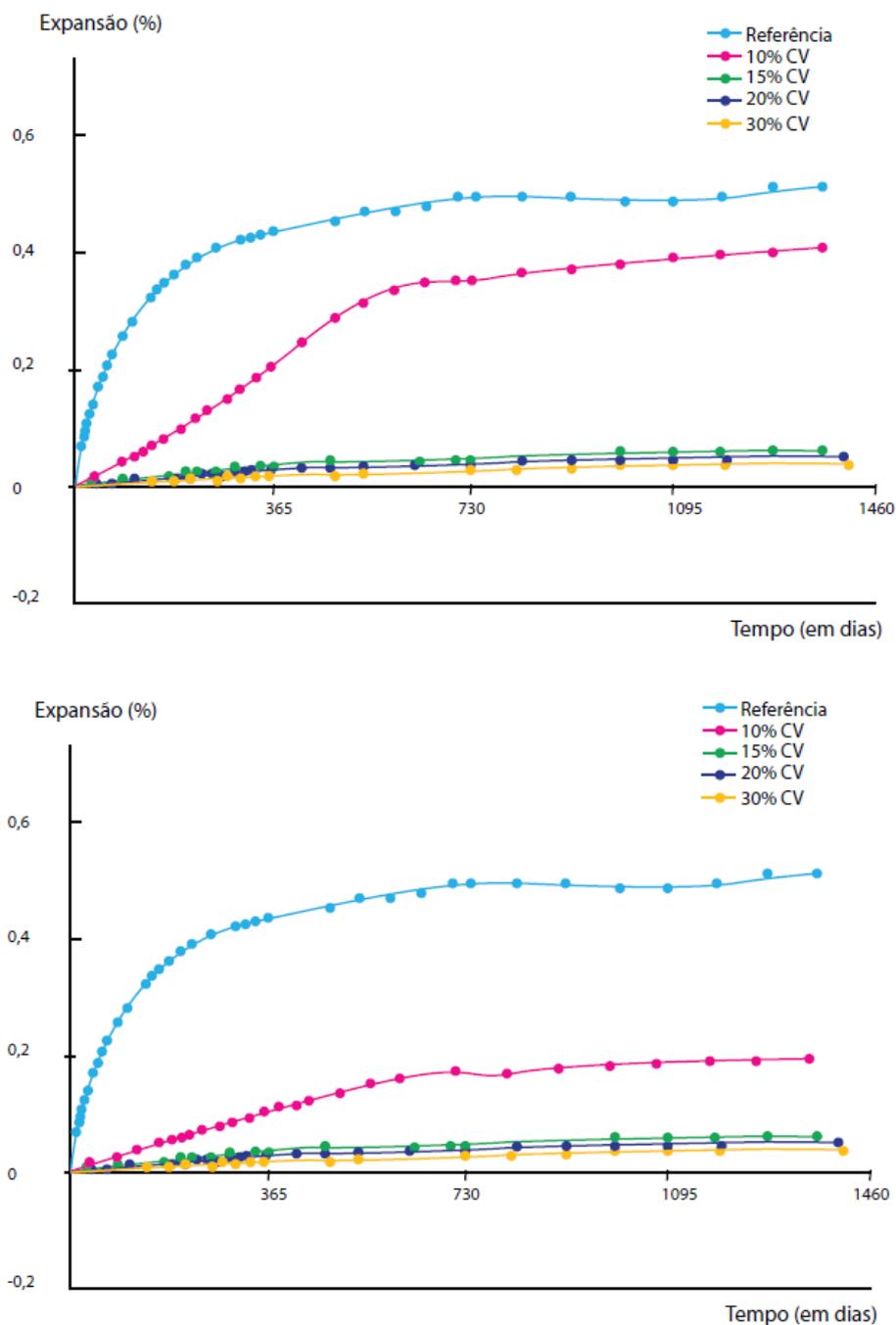


Figura 84: Efeito da supressão da expansão devida à etringite retardada(DEF) com a variação do teor de substituição (% em massa), de cimento Portland por adições minerais tipo II. Composições com cinzas volantes (1º gráfico) e metacaulino (2º gráfico) (adaptado)^[43].

Dessa forma, a formação de etringite é considerada a causa da maioria das expansões e de ser a principal causa da degradação das estruturas de betão em que estão envolvidos ataques sulfáticos. Porém isso não implica que todos os ataques por sulfatos causem necessariamente a formação de etringite. Efetivamente, são inúmeros os fatores que condicionam a formação deste composto, como, por exemplo, os constituintes do betão (nomeadamente o tipo de agregados, o tipo de cimento, a razão água/cimento, as adições minerais, bem como as condições de humidade e temperatura às quais o betão é exposto), a outra forma de deterioração que se pode manifestar traduz-se numa perda progressiva de resistência, originada pela decomposição dos produtos hidratados da pasta de cimento, resultando conseqüentemente na degradação do betão (Soares, et al., 2008).

Neste caso pode-se falar na formação de etringite secundária, sendo que este fenómeno já é conhecido a pelo menos duas dezenas de anos, e tem sido encontrado em betões de composição particularmente sensíveis, expostos a um ambiente propício (com humedificação frequente) e tendo sofrido um tratamento térmico relativamente elevado ($> 65^{\circ}\text{C}$) ou tendo atingindo temperaturas equivalentes por outra razão (como, por exemplo, na concepção de peças maciças de betão, ou de betonagens realizadas em período estival, etc.) (41).

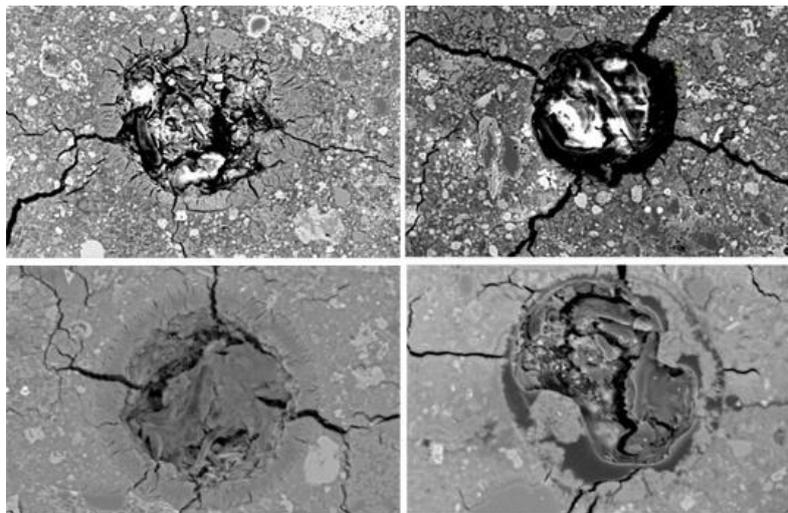


Figura 85: Vista ao microscópio eletrónico de varrimento de etringite expansiva decorrente de reações sulfáticas externas em amostras de betão [52].

O estudo dos mecanismos reacionais é ainda objeto de numerosas investigações. De entre os vários mecanismos propostos, distinguem-se mais frequentemente dois processos reacionais principais que intervêm na formação de etringite retardada (41):

- A instabilidade da etringite aumenta com o aumento da temperatura e da basicidade. Acima de 80°C , o monosulfoaluminato de cálcio hidratado fica estável em detrimento da etringite. Além disso, a solubilidade da etringite aumenta com a temperatura o que conduz a um aumento do teor em iões sulfato (SO_4) na solução intersticial, susceptíveis de ser remobilizados posteriormente.

- Uma modificação das reações de hidratação do par aluminato tricálcico (C_3A) - gesso devido a uma elevação de temperatura. De fato, existe uma competição entre duas reações que implicam o consumo dos iões sulfatos nas primeiras idades (41):

- A reação normal entre os SO_4 e o C_3A para formar etringite primária.
- A fixação dos sulfatos por absorção física nos sulfatos de cálcio hidratados (CSH). Estes podem ser remobilizados posteriormente para formar, depois do betão endurecido, etringite potencialmente expansiva. Além disso, com o aumento de temperatura, ocorrerá a desordenação da estrutura do CSH, o que provocará um aumento da porosidade dos CSH, propícia aos movimentos de água e iões no material ⁽⁴¹⁾.

Estas degradações de causa térmica foram observadas inicialmente sobre elementos de betão pré-fabricados (travessas de caminhos de ferro, tubos, postes de iluminação, entre outros), onde o “confinamento” originado pelas formas onde se encontrava o betão, não permitia que o calor gerado fosse convenientemente libertado, aumentando assim a temperatura no interior da peça e conseqüentemente a do cimento para valores muito altos, ou no caso de peças maciças de betão, onde o grande volume de betão utilizado ou em quaisquer outras estruturas maciças de betão betonadas in-situ, não permitia a conveniente libertação de calor do interior para o exterior da peça.

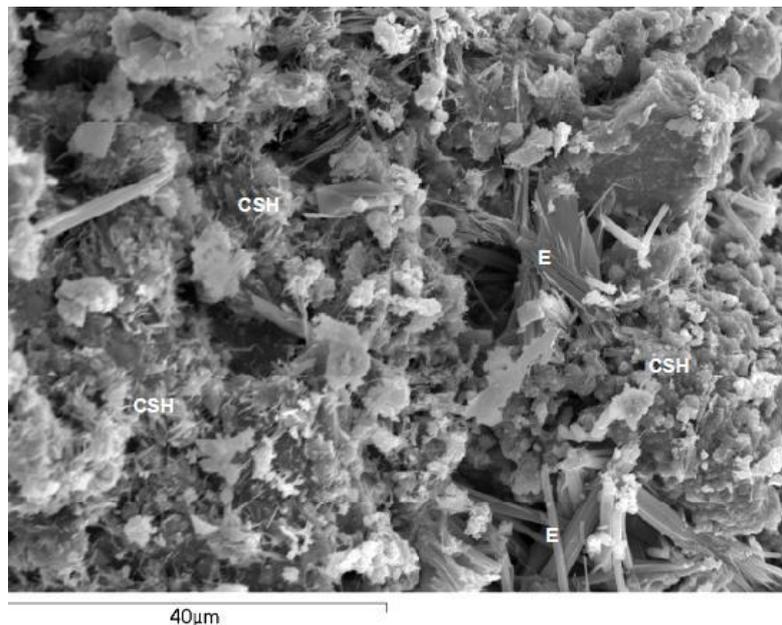


Figura 86: Aspeto ao Microscópio Eletrônico de Varrimento (MEV) de uma pasta de cimento Portland, com silicatos hidratados (CSH) e etringite primária (E) ^[53].

O controle da temperatura pode ser feito quando se atua na composição do betão, durante e após a sua aplicação. No primeiro caso, pode-se utilizar um cimento de baixo calor de hidratação, limitar a dosagem do cimento ou utilizar adições pozolânicas. No segundo caso, pode-se promover o arrefecimento do betão durante a fabricação (obtidos por ex. com adição de azoto líquido ou de gelo na betoneira, arrefecendo previamente os agregados), durante e após a colocação (obtidos por ex. ao fazer circular água fria em condutas), no entanto essas medidas são muito dispendiosas e são utilizadas somente em casos especiais e pontuais, também se podem realizar as betonagens fora dos períodos de maior calor do dia de forma a minimizar o efeito das altas temperaturas no betão ⁽⁴¹⁾.

Uma causa secundária (para além do aumento da temperatura) é a presença de um forte teor em álcalis do cimento (sódio (Na^+) e potássio (K^+)). O efeito é similar ao efeito que irá provocar no betão, que será muito semelhante ao efeito provocado pelo aumento da temperatura, ou seja, provocar o aumento da solubilidade da etringite. Embora a sua fonte principal seja no cimento, os álcalis podem provir de outras fontes, nomeadamente, na água de amassadura, nas adições, e dos próprios agregados utilizados (Bérubé et al., 2002).

A presença destes iões em solução, em elevada quantidade, tenderá a aumentar o pH da solução intersticial do betão, sendo que o pH normal deste ronda os 13,3. A esse valor de pH (à temperatura ambiente e para concentrações de álcalis baixas), a etringite permanece estável. No entanto, tal como já foi referido, quando se registra um aumento de temperatura ou da concentração de álcalis, a etringite se decompõem rapidamente prevalecendo o monosulfoaluminato como a forma mais estável. Globalmente, como mencionado, distinguem-se dois tipos distintos de etringite, a etringite primária e a etringite secundária. No entanto, verifica-se que, a nível macroscópico, a primária encontra-se uniformemente distribuída na pasta de cimento endurecida.

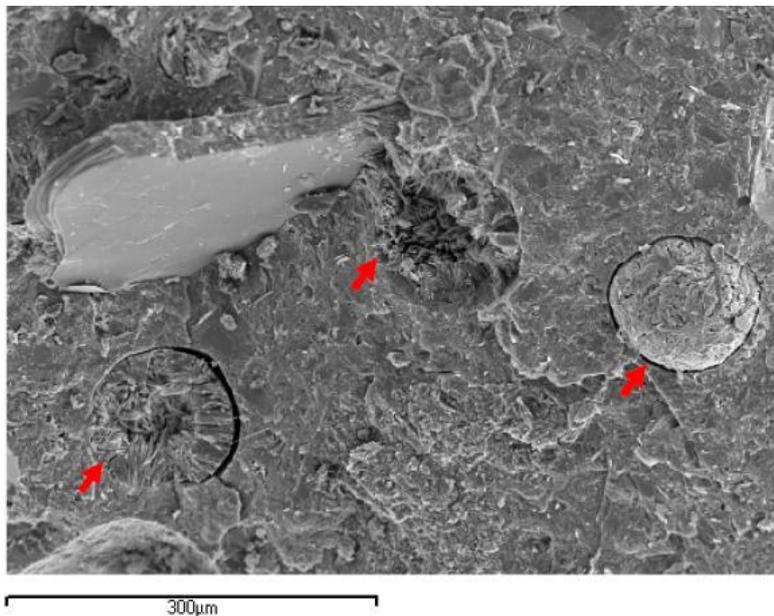


Figura 87: Aspeto ao MEV de uma pasta de cimento Portland com poros preenchidos (setas a vermelho) por etringite secundária

[53]

Mas, e tal como já mencionado neste trabalho, durante o processo de cura, verifica-se que a etringite é instável a temperaturas da ordem dos 80 °C, resultando quer na sua decomposição quer na sua não formação. Contrariamente, a etringite secundária apenas se forma após o endurecimento do betão tanto devido a ataques externos como a ataques internos de sulfatos (41).

Uma forma particular de etringite secundária é a que está diretamente associada a betões que sofreram tratamentos térmicos (onde a sua temperatura foi elevada para acima dos valores que se obteriam com o calor da hidratação do cimento), ou que estiveram sujeitos a elevadas temperaturas. Nesse caso, se o betão depois de endurecido estiver em contato com a água ou em condições húmidas à temperatura ambiente, a etringite se formará lentamente na matriz de cimento ou se irá dar uma eventual recristalização nos espaços vazios (caso tenha havido uma

decomposição *a priori*). Este processo é denominado por "formação da etringite retardada" (Soares, et al., 2008), reação essa, que é seguida da expansão do betão com a consequente fissuração do mesmo. Como se verificou anteriormente, os sulfatos de origem interna podem ser associados a diversas fontes, nomeadamente, à libertação tardia dos sulfatos de clínquer, à dissolução seguida de re-precipitação de etringite primária resultante da hidratação normal dos cimentos, ou ainda à formação de etringite secundária ou retardada devida ao efeito da temperatura.

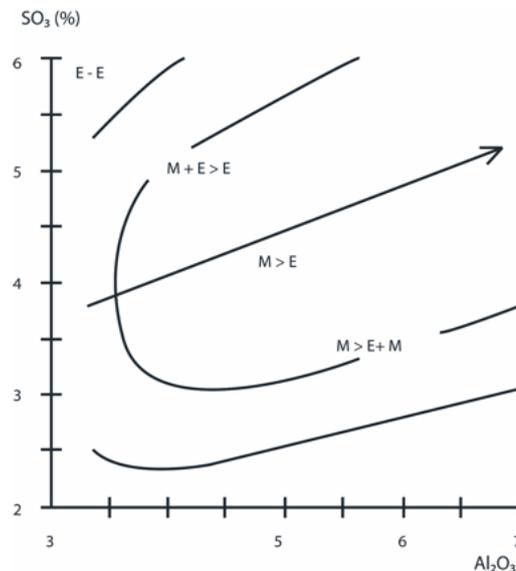


Figura 88: Ilustração das tendências para a formação de etringite após o arrefecimento do betão, as linhas de tendência representam a quantidade de etringite formada após o arrefecimento, que aumenta no sentido da seta. O M representa o monossulfato e E a etringite, M+EE significa que existe monossulfato e etringite durante o aquecimento e que depois no arrefecimento aquele se transforma totalmente em etringite (adaptado) [43].

Apenas este último tipo de etringite retardada (DEF), irá provocar a expansão do betão. Essa expansão se verifica com frequência em betões, onde foi utilizado cimento Portland que tenha sido curado com tratamentos térmicos, e claro, dependente dos materiais, condições de cura e condições ambientais (Soares, et al., 2008).

4 - Alguns exemplos de manifestações patológicas nas estruturas de betão e formas de prevenção/reparação.

Como se tem verificado ao longo deste trabalho, existem diversos tipos de manifestações patológicas nas estruturas de betão, cada uma relacionada com um agente ou combinação de agentes de natureza química ou biológica, que irão afetar a curto/longo prazo as estruturas onde esses agentes atuam.

A título de exemplo, neste trabalho se destacará um artigo de três autores Brasileiros⁹⁹ sobre a corrosão galvânica por meio da fixação de estruturas metálicas para veiculação de

⁹⁹ Leonardo Silva Zapla, Patrícia Fraga Rocha Rabelo, Ana Seroa da Motta, Niterói - Rio de Janeiro, Brasil.

propaganda em fachadas e empenas das edificações. Nesse artigo é analisado o avanço da publicidade¹⁰⁰ em edificações por meio das suas fachadas e empenas que poderá ocasionar danos aos revestimentos externos e a estrutura de betão armado, em especial nas vigas e pilares periférico.

Com isso, a edificação poderá apresentar sintomas patológicos prematuros, uma vez que a instalação da estrutura metálica que dá suporte a lona de vinil é fixada a edificação por meio de parafusos, podendo então ocasionar células de corrosão na estrutura periférica, devido à presença e proximidade de dois metais distintos.

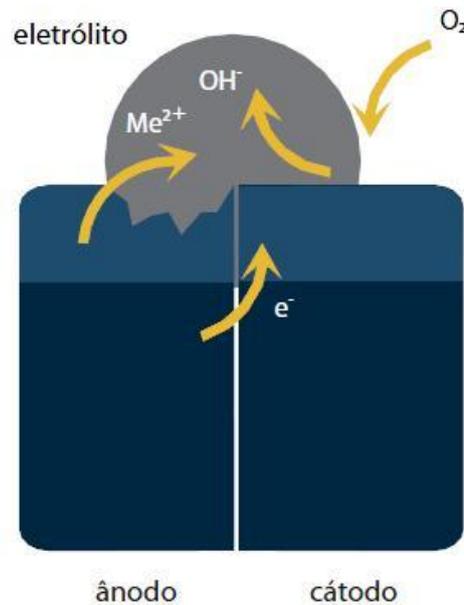


Figura 89: Mecanismo básico da corrosão galvânica (adaptado)^[54].

Um agravante a essa situação reside nos locais com incidência de gás carbônico e iões cloretos, que serão prejudiciais para este sistema publicitário. É do conhecimento dos especialistas, que a combinação de ambos ou a presença de um ou outro poderá acelerar a corrosão galvânica¹⁰¹, ocasionando a redução da seção do aço estrutural e conseqüentemente o destacamento do betão e dos revestimentos ⁽⁴⁶⁾.

É de se salientar que o avanço da corrosão acontecerá durante o ciclo de secagem/molhagem da superfície onde o parafuso estiver inserido. Uma vez que devido ao furo, a água terá o seu ingresso facilitado pelas micro fissuras formadas, quer seja pelo furo ou pela incompatibilidade entre o parafuso e o revestimento de base ⁽⁴⁶⁾.

¹⁰⁰ Publicidade é um termo que pode englobar diversas áreas de conhecimento que envolva esta difusão comercial de produtos, em especial atividades como o planeamento, criação, produção e veiculação de peças publicitárias.

¹⁰¹ O contato elétrico entre materiais diferentes resulta no processo corrosivo conhecido como corrosão galvânica. A intensidade deste tipo de corrosão será proporcional à distância entre os valores dos materiais envolvidos na tabela de potenciais eletroquímicos, em outras palavras, na "nobreza" dos materiais. Exerce influência neste tipo de corrosão a proporcionalidade entre as áreas anódica e catódica. Tal proporção deverá ser menor possível com vistas a se obter a mínima corrosão na área anódica aliada a sua uniformidade.

Outro artigo¹⁰² que será aqui abordado se refere aos trabalhos realizados no Viaduto Duarte Pacheco em Lisboa, com o objetivo de aprofundar o conhecimento sobre as reações expansivas de origem interna que aí foram diagnosticadas, com vista a definir a metodologia de reparação que foi implementada⁽⁴⁷⁾.

4.1 - Corrosão galvânica por meio da fixação de estrutura metálica para colocação de publicidade em fachadas e empenas de edificações.

Em 2008, 3 investigadores brasileiros fizeram um estudo cujo objetivo consistiu na observação e avaliação das patologias nas edificações devido à instalação de publicidade nas fachadas ou empenas dos prédios, decorrente da fixação de estruturas metálicas para suporte de lonas de vinil onde era impresso o anúncio.



Figura 90: Propaganda instalada na fachada de um prédio em Salvador, Bahia, Brasil [55].

Na maioria das vezes (apenas com algumas raras exceções), a estrutura metálica é fixada na estrutura da edificação por meio de parafusos de metal. Uma vez que a publicidade tem grandes dimensões, o que envolve um peso próprio grande, e também as preocupações com a ação do vento e chuva, implicou que as áreas de fixação fossem normalmente as vigas e pilares de betão periféricos, os quais contêm armaduras de aço ⁽⁴⁶⁾.

Tal publicidade quando colocada em grandes centros comerciais, onde a incidência de gás carbónico é significativa (e em alguns casos a proximidade com o mar irá “abastecer” o ambiente com iões cloretos), irá induzir à corrosão. Esse trabalho teve então como objetivo

¹⁰² Júlio Appleton, António Costa; Degradação de estruturas por reacções expansivas de origem interna, Caso de estudo: Viaduto Duarte Pacheco em Lisboa(2007).

alertar que a proximidade de metais distintos (metal de fixação e a armadura de aço), dióxido de carbono (CO_2) e/ou iões cloretos presentes no ambiente, aliado à presença de humidade, ocasionará a corrosão acelerada do metal mais ativo. Os principais danos observados são o aparecimento de manchas de ferrugem e destacamento do betão, devido à expansão provocada pela corrosão do aço, ocasionando um dano estrutural que poderá do ponto de vista técnico ser de difícil reparação e de elevado custo operacional ⁽⁴⁶⁾.

Os condomínios residenciais e comerciais adotaram nos últimos anos uma modalidade de captação de recursos que tem por objetivo a redução da quota de condomínio. Os grandes espaços visuais formados pelas fachadas das edificações são disputados metro a metro pelas empresas de publicidade. Estes dividendos têm como objetivo serem direcionados para a manutenção da edificação, mas o fato é que a maioria das edificações não tem uma manutenção preventiva. Normalmente só são feitas vistorias quando já foi detectado algum efeito degenerativo, como o desprendimento de parte dos revestimentos ou a existência de humidade nas paredes ⁽⁴⁶⁾.

Segundo o referido artigo, "... o avanço da publicidade em edificações por meio das suas fachadas e empenas poderá ocasionar danos aos revestimentos externos e a estrutura de betão armado, em especial nas vigas e pilares periféricos. Com isso, a edificação poderá apresentar sintomas patológicos prematuros, uma vez que a instalação da estrutura metálica que dá suporte à lona de vinil é fixada na edificação por meio de parafusos, podendo então ocasionar células de corrosão na estrutura periférica, devido à presença e proximidade de dois metais distintos..." ⁽⁴⁶⁾.

Como anteriormente foi referido, a incidência de CO_2 e iões cloreto serão prejudiciais para este sistema publicitário. De fato, a combinação de ambos os agentes ou a presença de um ou outro, poderá acelerar a corrosão galvânica, ocasionando dessa forma a redução da seção do aço estrutural e conseqüentemente o destacamento do betão e dos revestimentos. É sabido que o avanço da corrosão acontecerá durante o ciclo de secagem/molhagem (tal como já foi mencionado anteriormente neste trabalho), da superfície onde o parafuso estiver inserido. Uma vez que devido ao furo, a água terá o seu ingresso facilitado pelas micro fissuras formadas, ou simplesmente pela incompatibilidade entre o parafuso e o revestimento de base ⁽⁴⁶⁾.

Assim o processo desenvolve-se a partir da ação ou da combinação dos seguintes fatores:

- Corrosão galvânica;
- Carbonatação;
- Presença de iões cloreto.

A corrosão galvânica ocorre devido à diferença de potencial elétrico entre metais diversos, nesta situação uma corrente elétrica fluirá através de um eletrólito interligando-os. Neste caso, este eletrólito será a água que se infiltra pelas micro fissuras existentes no paramento ou por absorção capilar (Cunha e Neumann, 1979) ⁽⁴⁶⁾.

A carbonatação é um dos processos químicos que intervém ou pode intervir neste tipo de ataque, seja por se tratar de um edifício comercial (com grandes índices de CO_2 , por exemplo, uma ponte ou viaduto, ou ainda de qualquer outra estrutura de betão perto de uma rede

viária). O processo de carbonatação já foi descrito anteriormente neste trabalho, mas é de se salientar que a velocidade do avanço do processo de carbonatação pode ser acompanhada pela seguinte fórmula⁽⁴⁶⁾:

$$P = \frac{K}{\sqrt{t}}$$

Onde:

P = profundidade da carbonatação, em centímetros;

K = coeficiente que varia entre 0,2 a 0,5;

t = tempo de vida do betão armado em anos, (Cunha & Neumann, 1979).



Figura 91: Foto de patologias provocadas pela instalação de um painel publicitário [56].

Tal como com a carbonatação, os cloretos já foram abordados anteriormente neste trabalho, no entanto, é possível determinar o teor de cloretos necessários para que ocorra a depassivação do aço. Segundo os autores do artigo, e de acordo com Goñi et al., 1990; Alonso et al., 1997, atualmente existem duas formas de expressar o teor de cloretos necessário para ocorrer a depassivação:

- A relação ião cloreto Cl^- / ião hidroxilo (OH^-) da solução dos poros;
- A quantidade de cloretos por unidade de cimento ou betão.

Esta relação é considerada como parâmetro mais adequado para se prever a corrosão. Contudo, (Alonso, et al., 1997) devido à grande quantidade de intervenientes, a obtenção do valor desta relação é muito difícil. No entanto, ainda não existe um consenso no meio científico sobre o teor de cloretos que pode causar a depassivação da armadura e conseqüentemente ocasionar a corrosão. Esta questão deve-se aos vários fatores que influenciam nos fenómenos de transporte e absorção de iões cloreto no betão. Como tem sido demonstrado, não só na apresentação do artigo em causa, mas ao longo de todo este trabalho, a agressividade ambiental

é o fator que mais influencia na durabilidade das estruturas. Por isso, diversos estudos são realizados com vista a ampliar as alternativas técnicas que possam atender de forma satisfatória todos os envolvidos na construção civil ⁽⁴⁶⁾.

Tem-se verificado em diversos casos que apesar de as estruturas estarem inseridas num ambiente agressivo, é permitido a instalação de estruturas metálicas para suporte de publicidade nas suas empenas e fachadas, sem nenhum detalhamento construtivo que assegure o não comprometimento das partes da edificação utilizada para tal finalidade. Os danos causados por este procedimento vão desde a fissuração em torno do parafuso de ancoragem até o desprendimento do revestimento reboco/emboco, por consequência de infiltrações que enfraquecem o sistema de base, devido à dissolução da pasta de cimento Portland, pela variação térmica e/ou o destacamento do betão devido à reação dos produtos de corrosão originados no interior da estrutura periférica que serve na maioria das vezes, de base ao parafuso de suporte da estrutura metálica ⁽⁴⁶⁾.

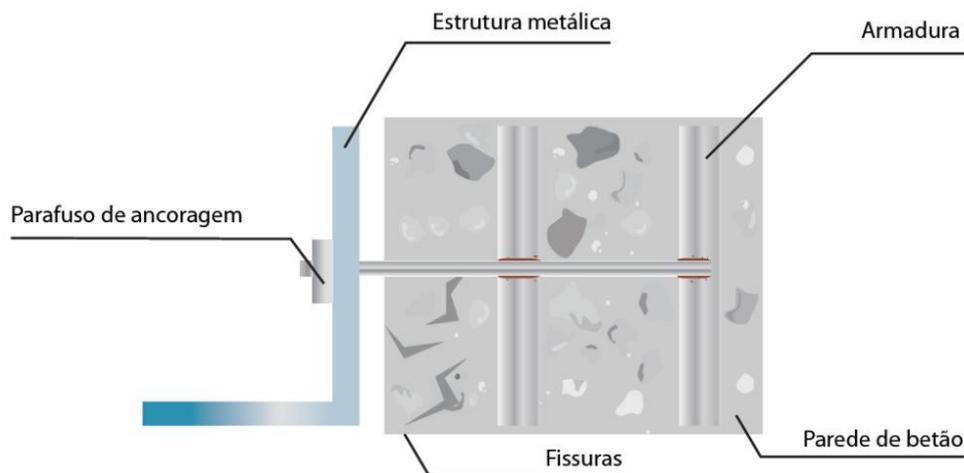


Figura 92: Esquema de ancoragem estrutural (adaptado) [56].

O uso dos espaços visuais das edificações é, sem dúvida, um negócio muito importante para os condomínios, porém, sugere-se que a edificação passe por uma vistoria de suas partes construtivas (nomeadamente as que foram utilizadas como base de fixação), para que sejam devidamente recuperadas. Assim devem-se acautelar problemas através da utilização de isolantes elétricos não porosos nos parafusos e estruturas metálicas, para que, se evite a corrosão galvânica (para os casos onde os metais em questão sejam distantes na série galvânica e por algum momento estejam ligados eletricamente e imersos num mesmo eletrólito). A pintura do metal mais nobre e menos nobre também é recomendada, mas caso não seja possível pintar todos os componentes, sugere-se a pintura do mais nobre do par galvânico (membro catódico), uma vez que a pintura do membro menos nobre (anódico) pode agravar a situação, pois poderá levar ao ataque por picadas¹⁰³ nos poros do revestimento, (Manual Gerdau, 2004) ⁽⁴⁶⁾.

¹⁰³ Trata-se de uma corrosão localizada, manifestada por picadas (perfurações de pequeno diâmetro) na superfície do metal. O cátodo e o ânodo encontram-se manifestamente separados. O ânodo situa-se no interior da picada enquanto a superfície circundante funciona como cátodo. Um recipiente de ferro pode se coberto com estanho (ferro estanhado). Enquanto a camada está intacta não há corrosão.

Os cuidados apresentados no artigo são de fácil execução e protegem as estruturas de betão onde são instalados os painéis publicitários da agressividade ambiental e da corrosão galvânica por um determinado espaço de tempo. No entanto, isso não dispensa a monitorização pelo proprietário responsável pela edificação ou estrutura, que solicitará nova vistoria e manutenção logo que se aperceba da descoloração e ou fissuração do revestimento de proteção aplicado. O artigo aqui apresentado revelou uma situação delicada no que se refere à manutenção das edificações, onde se observou falha e/ou a falta de intervenção preventiva ou corretiva. Os resultados mostram de forma preocupante (porém, tendo em vista o conhecimento atual dos processos e mecanismos destrutivos que atuam sobre as edificações) os danos inerentes à aplicação descuidada de painéis publicitários nas fachadas e empenas das edificações, sendo necessárias medidas preventivas para a sua aplicação ⁽⁴⁶⁾.

Como tem sido demonstrado ao longo deste trabalho torna-se perfeitamente possível evitar e/ou diagnosticar as causas das diversas patologias. A captação de recursos utilizando os espaços visuais das edificações para exposição de publicidade deve ser encarada como legítima, mas não apropriada sem o detalhamento técnico específico, que tem por objetivo minimizar ou evitar o surgimento de patologias e a consequente degradação da edificação. Assim sendo, sugerem-se aos proprietários das edificações que não negligenciem os cuidados necessários, não permitindo que suas fachadas e empenas sejam suporte de publicidade sem o acompanhamento técnico de um profissional habilitado, uma vez que algumas alterações serão perceptíveis somente num estado já avançado de degradação, pelo fato da barreira visual imposta pela propaganda ocultar a área atacada ⁽⁴⁶⁾.

Torna-se assim necessário uma investigação mais ampla e a sua respectiva divulgação nos meios pertinentes, de modo a massificar e consciencializar sobre a importância dos estudos técnicos face às necessidades da edificação. É do consenso geral que muitas edificações são concebidas já com vícios construtivos e na pós-ocupação toda e qualquer ação que possa vir a acarretar causas e/ou somar as já existentes, poderão dar origem a efeitos degenerativos na edificação. Esses efeitos deverão ser devidamente estudados por um profissional habilitado para uma correta avaliação do grau de importância da(s) mesma(s) para a edificação e seus respectivos usuários. Com isso, é possível minimizar a incidência das patologias e seus efeitos deletérios nas edificações e nas estruturas de betão ⁽⁴⁶⁾.

4.2 - Degradação de estruturas por reações expansivas de origem interna caso de estudo: Viaduto Duarte Pacheco em Lisboa.

O Viaduto Duarte Pacheco, é um viaduto de acesso a Lisboa, vindo da auto-estrada A5. O viaduto começa no final da Serra de Monsanto, atravessa o Vale de Alcântara, indo terminar em Campolide, no início da Rua Joaquim António de Aguiar. Permite a ligação ao Túnel do Marquês que, a partir daí dá acesso às principais artérias do centro de Lisboa.

O seu nome tem origem no nome do ministro das Obras Públicas, Eng^o Duarte Pacheco, grande impulsionador nos anos 40 da modernização da rede viária portuguesa, cuja estátua se encontra no lado norte do viaduto.

Este viaduto é uma ponte em arco, sendo o seu formato igual ao da Ponte da Arrábida, no Porto. O Viaduto Duarte Pacheco tem 355.10 m de desenvolvimento entre eixos dos encontros. A largura do tabuleiro é de 24.00 m dos quais 6.00 m foram inicialmente destinados a 2 passeios de 3.00 m cada. Cada faixa de rodagem comportava 2 faixas de 7.50 m (2 vias) e 1 separador central de 3.00 m (47).



Figura 93: Viaduto Duarte Pacheco após a sua conclusão [57].

O Viaduto Duarte Pacheco foi projetado em 1937 pelo Eng. João Alberto Barbosa Carmona e a obra foi executada de Abril de 1939 a Dezembro de 1944 pela "Sociedade de Empreitadas de Obras Públicas, Lda". A estrutura, integralmente realizada em betão armado, divide-se em 5 partes (47).

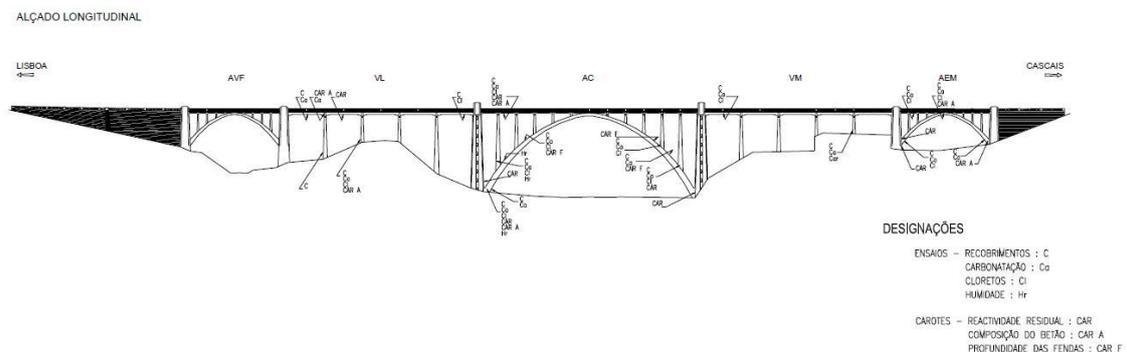


Figura 94: Alçado Longitudinal do Viaduto Duarte Pacheco em Lisboa [58].

Segundo Appleton et al, nos anos de 1993 a 1994, o LNEC realizou uma inspeção visual e um conjunto de ensaios de forma a caracterizar e avaliar o estado de deterioração do Viaduto Duarte Pacheco. Dessa inspeção, apresentada nos relatórios de Outubro de 1993 e de

Maio de 1994 (Relatório 123/94 NAB) do Proc. 022/1/11470, destacaram-se as seguintes conclusões ⁽⁴⁷⁾:

- Ocorrência de fendilhação em vários elementos da estrutura. Essa fendilhação apresentava-se quer de forma orientada ao longo das armaduras longitudinais, quer sem orientação preferencial definida. A deterioração estava concentrada no arco central e montantes dos apoios do tabuleiro (em especial nas faces viradas a Sul e na face superior dos arcos), e nas consolas do tabuleiro (na face inferior).



Figura 95: Obras de manutenção no Viaduto Duarte Pacheco em Lisboa ^{159j}.

- Os ensaios de carbonatação realizados apresentam valores inferiores a 15 mm O teor máximo de cloretos medido em relação à percentagem da massa de betão era inferior ao teor crítico a profundidades de 2 cm (valor médio de 0.03%). Por estes motivos, concluiu-se que a corrosão das armaduras não seria relevante (associada à sua despassivação pela ação da carbonatação ou ingresso de cloretos), restringindo-se a zonas de muito baixo recobrimento.
- Os ensaios de diagnóstico, nomeadamente análises efetuadas por microscopia eletrônica e micro análise dos raios X em amostras de betão, concluíram da existência de reações expansivas internas no betão. Foram detectados compostos típicos de RAS e DEF. As RAS estiveram associadas à presença de inclusões de sílica reativa na brita utilizada no betão, tendo causado a fissuração do betão. Quando essa fissuração se orienta segundo as armaduras, o resultado é a sua despassivação e corrosão ativa. Numa amostra extraída de uma viga do arco central determinou-se o teor em sulfatos a 10 e 25 mm tendo-se obtido valores de 0.75% e 0.27% da massa do betão.

Assim, e no seguimento dos estudos efetuados em 1993 e 1994, foram realizados em 1996 novos ensaios destinados a avaliar a reatividade residual aos álcalis dos agregados do betão. De acordo com as informações obtidas, as amostras foram extraídas na zona do arco central junto à ETAR de Alcântara, e após os estudos realizados, descritos no Relatório 65/96 NQ de Março de 1996, destacaram-se as seguintes conclusões ⁽⁴⁷⁾:

- Confirmou-se a existência de agregados reativos aos álcalis, na forma de grãos de sílex, silicificações fibrosas em grãos de calcário e grãos de quartzo reativo.
- Confirmou-se existir reatividade residual aos álcalis apenas em alguns provetes, o que foi interpretado como sendo devido há heterogeneidade na distribuição dos agregados reativos.
- Os produtos associados às reações expansivas na forma cristalina ou em gel, presentes na pasta e em interfaces brita/pasta, correspondem a silicatos hidratados de cálcio e potássio (e sódio).

Observou-se ainda a presença frequente de etringite secundária, devido a um ataque por sulfatos.



Figura 96: Patologias registradas no V. D. P. típica das reações expansivas da origem interna e a corrosão de armaduras ^[58].

Em 2001 foi solicitada uma nova inspeção, nesse caso para avaliação da deterioração existente no viaduto e se o problema das reações de origem interna (verificados anteriormente no arco central) era geral, ou se estava circunscrito às áreas já detectadas. Paralelamente pretendia-se reformular as metodologias de reparação e proteção geral da ponte ⁽⁴⁷⁾.

No que se refere ao problema em análise no artigo, é importante referir que a fendilhação que se verificava nos pilares e arcos apresentava em algumas zonas aberturas

significativas e com grandes profundidades (expondo assim o seu interior aos agentes exteriores). Para além da fendilhação e geometria irregular, foi observada nos pilares e arcos uma fendilhação orientada segundo o eixo longitudinal. Nos arcos a fendilhação ocorre com maior incidência nas fases superiores e laterais. Nas faces superiores essas fendas atingiam vários milímetros, sendo que essa fendilhação produz a despassivação das armaduras originando e acelerando a sua corrosão e subsequente delaminação do betão (com destacamento de partes do mesmo). Muito embora a fendilhação associada às reações expansivas seja mais significativa nos pilares e arcos do Arco Central este problema já se detectava em vigas do tabuleiro, na totalidade do viaduto ⁽⁴⁷⁾.

Dessa forma foram necessários ensaios complementares, para que se pudesse de forma clara e concisa determinar o estado de degradação nas zonas analisadas durante a inspeção realizada em 2001, mas tendo em conta que os mesmos seriam realizados num conjunto de regiões seleccionadas com as características dos diferentes elementos estruturais e dos diferentes níveis de deterioração verificados, assim realizaram-se os seguintes ensaios ⁽⁴⁷⁾:

- Medição do recobrimento (50 locais);
- Medição de profundidade de carbonatação;
- Perfis de cloretos;
- Extração de carotes (25 no total);
- Medição da humidade no interior do betão;
- Avaliação da variação da composição do betão nas várias estruturas (6 carotes no total);
- Avaliação da reatividade residual aos álcalis e sulfatos internos (15 carotes no total).



Figura 97: Medição da humidade no interior do betão ^[58].

Com base nos resultados obtidos nesses ensaios determinaram-se quais as intervenções que seriam necessárias, e a sua respectiva forma de procedimento.

De acordo com os autores do artigo em questão, e tal como já mencionado anteriormente, a inspeção efetuada à estrutura mostrou que os principais tipos de deterioração instalados na estrutura são a fendilhação do betão e a corrosão de armaduras. Relativamente à fendilhação referem-se os seguintes aspetos principais ⁽³⁷⁾:

- A causa deste tipo de deterioração foi decorrente de reações expansivas entre os álcalis e a sílica reativa dos agregados.
- Os elementos mais afetados foram as faces superiores e laterais dos arcos centrais, os pilares sobre os arcos centrais, as pilastras dos arcos centrais e as vigas de bordo do lado Sul dos Viadutos de Monsanto e de Lisboa. As fendas nos arcos centrais desenvolveram-se até profundidades elevadas (> 40 cm).
- Os ensaios de composição do betão indicam que existiam agregados reativos em toda a estrutura. Os ensaios de medição do teor de humidade mostraram que a humidade relativa no interior dos elementos estruturais é superior a 85%. O teor de álcalis do betão é relativamente baixo. No entanto, considerou-se que os ensaios realizados não eram conclusivos, dado terem sido analisadas apenas três amostras de betão.
- O maior nível de fendilhação observado nos arcos centrais e nos pilares sobre estes arcos deveria estar associado à maior espessura destes elementos, às condições de exposição da estrutura nessa zona e à eventual maior concentração de agregados reativos nesses elementos estruturais.
- Os ensaios realizados indicaram que estão reunidas as condições para que as reações expansivas se continuem a desenvolver na estrutura, o que tem implicações importantes nas metodologias de intervenção.

No artigo, no que se refere à corrosão das armaduras foram salientados os seguintes aspetos ⁽⁴⁷⁾:

- Os elementos mais afetados pela corrosão das armaduras são os pilares sobre o arco central, a face inferior das consolas do tabuleiro, a face inferior dos arcos laterais e os guarda-corpos.
- Nos pilares sobre o arco central a causa deste tipo de deterioração foi a fendilhação originada pelas reações expansivas. Nos outros elementos da obra atrás referidos a causa principal da corrosão de armaduras foi o reduzido recobrimento dos varões.
- Os recobrimentos de armaduras apresentam valores razoáveis na maior parte dos elementos estruturais, com exceção da face inferior das lajes do tabuleiro e zonas locais da face inferior dos arcos onde se verificam valores muito baixos.
- A profundidade de carbonatação é pequena, com exceção dos tabuleiros onde se observaram valores superiores aos dos restantes elementos estruturais. Este fato, associado ao menor recobrimento das armaduras nas lajes do tabuleiro, implicou que nessa altura já existia uma percentagem significativa de varões despassivados. Nas consolas o problema era mais gravoso dado que essas zonas estão sujeitas a condições

de humidade elevada que conduzem a maiores velocidades de corrosão. Nos painéis interiores da laje o problema tinha menor expressão dado o betão se apresentar seco.

- A contaminação da estrutura por cloretos era baixa e ocorria apenas na camada superficial do betão. Este aspeto mostra que não existem problemas de corrosão originados por este agente agressivo, à exceção de zonas locais onde se verificavam recobrimentos muito baixos ou zonas muito fendilhadas.

No que se refere à(s) metodologia(s) de intervenção a implementar no Viaduto Duarte Pacheco, verificou-se a necessidade de reparar, proteger e monitorizar a estrutura permanentemente, dada as características da obra, assim como da sua utilização (47):

- Reparar as zonas com indícios de corrosão de armaduras, reconstruindo o betão da camada superficial com microbetão ou argamassas pré-doseadas. Em zonas com extensão significativa foi previsto o reforço com malha de aço galvanizado que tinha o objetivo de controlar, reduzindo assim a abertura de fendas devidas a novas reações expansivas.
- Reparar as zonas com fendilhação acentuada provocada pelas reações expansivas, embora sem corrosão de armaduras. Nas fendas de abertura superior a 1.0 mm foi prevista o seu preenchimento com calda de cimento e a selagem do bordo com poliuretano. Nas fendas com abertura entre 0.4 mm e 1.0 mm foi previsto somente a sua selagem.
- Proteger a estrutura em relação ao mecanismo de corrosão de armaduras e atenuar as reações expansivas álcalis-sílica. Nesse efeito de proteção é assim essencial a eficácia no controle das trocas de humidade entre o ambiente exterior e a estrutura de betão. Assim, o sistema deveria eliminar a penetração de água para o interior do betão ao mesmo tempo em que possibilitasse a saída de vapor de água do interior do betão para o meio exterior. Paralelamente o sistema de proteção superficial deveria ainda garantir uma adequada proteção em relação à penetração do CO₂ e deveria possuir capacidade de deformação para absorver, sem fendilhar, as deformações expansivas (e abertura de fendas), devidas às reações álcalis-sílica.

Sendo assim, esse sistema de proteção superficial multi-barreiras é composto pelos seguintes elementos (47):

- Impregnação hidrofugante, sistema aplicado por projeção e que penetra na estrutura porosa superficial do betão, revestindo os poros e repelindo a água;
- Barramento das fendas, incorporando malha de fibras de vidro;
- Pintura (revestimento espesso e flexível), aplicado pelo menos em duas demãos cruzadas e com espessuras diferenciadas nos seguintes elementos (47):
 - Arcos centrais;
 - Pilares sobre os arcos centrais;
 - Pilastras dos arcos centrais;

- Vigas exteriores do tabuleiro.
- Monitorizar a obra relativamente aos mecanismos de corrosão das armaduras ⁽⁴⁷⁾:
 - Através da introdução de células de corrosão que permitam identificar a altura em que ocorre a despassivação das armaduras e a evolução da velocidade de corrosão.
- Monitorizar a obra relativamente ao desempenho da proteção superficial ⁽⁴⁷⁾:
 - Através da instalação de células de resistividade, as quais permitem avaliar a vários níveis a evolução da humidade do betão.
- Monitorizar a obra relativamente ao desenvolvimento das reações expansivas ⁽⁴⁷⁾:
 - Através da instalação de sensores de fibras ópticas para medição de deformações.

5 – Considerações finais e conclusões.

Ao longo deste trabalho pode-se verificar que os ataques químicos no betão, são um dos fatores mais importantes a considerar num projeto de estruturas, sendo que as suas consequências estão disseminadas nas estruturas de betão espalhadas pelo mundo, uma vez que esse fator não era considerado na fase de projeto e execução das estruturas propriamente ditas.

O ponto fulcral do estudo das ações dos ataques químicos nas estruturas de betão, assim como nas suas consequências para a mesma, prende-se com a questão da maximização da durabilidade das estruturas de betão armado e pré-esforçado. A sua importância está relacionada com a prática de um desenvolvimento sustentável na construção, visto que se os projetistas e engenheiros colocarem em prática um “projeto com vista à durabilidade”, irão contribuir para a melhoria significativa da longevidade das estruturas de betão e consequentemente para a redução dos custos de reparação a longo prazo da estrutura, assim como no consumo de recursos na indústria do betão, tal como estão descritas nas especificações LNEC E464 (metodologias prescritivas), e E465 (metodologias de desempenho), ambas visando o adequado desempenho das estruturas para determinada vida útil das mesmas.

Apesar disso, em todo o mundo tem-se verificado um aumento significativo no número de ocorrências de estruturas afetadas pelos ataques químicos, nomeadamente por corrosão e reações expansivas internas, embora existam estruturas afetadas por outros tipos de ataques químicos com origem interna e externa. É, por isso, essencial que se tomem medidas para o incentivo à busca de soluções que impeçam o seu surgimento, pois embora ainda não se tenha uma solução corretiva para todos os tipos de ataques químicos (como por exemplo, as reações expansivas internas), com o conhecimento adquirido em inúmeros casos de estudo, pode-se evitar que novas estruturas manifestem anomalias, utilizando para isso métodos eficientes na

prevenção (em fase de projeto e execução), eliminando dessa forma maiores gastos com manutenção e, em última instância, a perda de capacidade operacional da estrutura.

É, portanto imperativo que a ação preventiva seja tomada como ponto de partida de forma a evitar danos decorrentes dessas reações, estando estas intimamente ligadas ao grau de risco da sua ocorrência em função das condições de exposição e do tipo de estrutura que se pretende construir, e que, no caso de estruturas já afetadas, se deverá intervir na reparação e tratamento da deterioração das estruturas em causa, em função das probabilidades de falha máximas admissíveis, isso associado ao tipo de dano(s) ou patologia(s) existente(s) na estrutura.

Com este trabalho uma das conclusões mais importantes a tirar, no caso das novas construções, é da importância da aplicação das normas existentes no projeto de durabilidade de estruturas de betão armado e pré-esforçado, com o objetivo de garantir a durabilidade da estrutura. No caso das estruturas já existentes, deve-se efetuar com alguma periodicidade ensaios de inspeção ao longo do tempo de modo a conhecer o estado de degradação existente nas estruturas em determinado instante, sendo que essa situação acarreta a mobilização de diversos recursos inerentes à realização dessas inspeções, tais como ensaios laboratoriais.

Para a realização deste trabalho, a consulta bibliográfica foi larga e muito diversificada, sendo por vezes difícil selecionar a informação a adicionar nesta dissertação, visto que cada tipo de ataque químico por si só justificaria uma dissertação. No entanto, essa consulta bibliográfica demonstrou que já existe um conhecimento bastante significativo sobre esta matéria, verificando-se, no entanto, que existe uma falta de consenso por parte dos investigadores, relativamente a alguns assuntos, nomeadamente no que se refere aos mecanismos inerentes às próprias reações em si.

Contudo, a partir dessa pesquisa bibliográfica pode-se concluir que, antes de tudo, a composição do betão é o principal fator a considerar, visto que o betão é a fonte principal dos componentes necessários para o desencadear das reações, nomeadamente na quantidade de sílica existente nos agregados e de sulfatos do cimento. É importante mencionar que ainda não existe um consenso relativamente à listagem das rochas em função da sua reatividade, (conhecendo a sua origem ou a designação petrográfica atribuída). Também se conclui que as estruturas mais vulneráveis ao desenvolvimento de patologias devido aos ataques químicos, são as estruturas de betão que estão em contato com a água (seja ela doce ou salgada), e que as características do betão, as condições de exposição à humidade, ao CO₂, cloretos e aos álcalis para além dos sulfatos, nitratos, sais de magnésio e ácidos (orgânicos ou inorgânicos), assim como, da variação de temperatura (devido ao confinamento das seções, ou devido à quantidade de betão utilizada), são fatores extremamente importantes ao desenvolvimento dos ataques químicos no betão.

6 – Bibliografia.

Allen, William et al; (2007), Protection of Metals in Concrete Against Corrosion, ACI 222R-01, Reported by ACI Committee 222.

Alves, M.^a Teresa Pinheiro et al; (2007), Um cimento mais sustentável frente a um ataque severo por sulfatos, Congresso Construção - 3.º congresso Nacional 17 a 19 de Dezembro, Coimbra, Portugal, Universidade de Coimbra.

Amin, M. M. et al; (2008), Effects of magnesium sulfate attack on ordinary Portland cement (opc) mortars, Portugalia e Electrochimica acta 26,235-242 pp.

Andrade, João; (2009), APEB, Evolução da marcação CE, Certificação do controlo da produção das centrais de betão, Seminário.

Appleton, Júlio;(2009/2010), IST DECivil, Durabilidade de estruturas de betão armado e pré-esforçado, Estruturas de betão I, Folhas de apoio às aulas, Módulo 6.

Appleton, Júlio; Costa, António;(2007), Degradação de estruturas por reacções expansivas de origem interna, Caso de estudo: viaduto Duarte Pacheco em Lisboa.

Appleton, Júlio;(2010), Seminário: Eurocódigos estruturais: O início da sua aplicação em Portugal, Projecto de Estruturas de Betão, Eurocódigo 2 – NP EN1992-1-1.

Al-gahtani , A. S.; Maslehuddin , M.; (2002), Characteristics of the Arabian Gulf environment and its impact on concrete durability – An overview, The 6th Saudi Engineering Conference, Kfupm, Dhahran.

APEB, (1998), Proceedings of the 12th European Ready Mixed Concrete Congress vol.2, Artes gráficas Simões Lda.

APEB, (2008), Guia para a utilização da norma NP EN 206-1, A especificação do betão.

Andrade,C.; Kropp, J.:(2004), Testing and Modelling Chloride Ingress into Concrete, Proceedings of the 3rd International RILEM Workshop, RILEM Publications.

Alexander, M. et al; (2006), Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Taylor & Francis Group.

Baron, J. ; Sauterey, R. ; (1982), Le beton hydraulique, connaissance et pratique, Presses de l'ecole nationale des Ponts ET chaussées.

Bensted, J.;Barnes, P.; (2002), Structure and Performance of Cements, Second Edition, Spon Press (2002).

Campiteli, Vicente Coney; (2004), Concreto de cimento Portland: Um método de dosagem, Universidade estadual de ponta grossa, Paraná, Brasil.

Caracterização de produtos de deterioração do betão por métodos petrográficos, ISSN 1645-0388, volume 9 – nº 21.

Castro, José; Matins, João Guerra;(2006), Reabilitação, Patologia do betão, Reparação e reforço de estruturas, Série reabilitação 1ª edição.

Catálogo SPY Building, Inspeção de edifícios, Análise de patologias e anomalias técnicas, Apresentação da empresa spybuilding.

Chromá, Markéta; (2007), Integrated design of structures and systems for construction, Theoretical bases of integrated design, Methods of structural design stressing durability and reliability, Degradation models; assessment of material imperfections and technological, Effects, definition of critical values of degradation impacts, Application modelling of chloride ingress.

Collepari M.:(2003), A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete, Cement & Concrete composites 25, 401–407 pp.

Costa, A.; (2007), IST DECivil, Patologia do betão armado, anomalias e mecanismos de deterioração, Instituto Superior Técnico, Reabilitação e reforço de estruturas, Diploma de formação avançada em engenharia de estruturas.

Coutinho, Maria Joana Álvares de Sousa; (2005), Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem, FEUP edições.

Coutinho, Joana de Sousa;(2001), Durabilidade, Ataque por sulfatos, FEUP.

Creegan, Patrick J. et al; (2008), Erosion of Concrete in Hydraulic Structures, Reported by ACI Committee 210.

Cristino, A. F. et al;(2008), Internal expansive reactions in concrete, Prevention of its occurrence, Materials science forum vols. 587-588, 867-871 pp.

CSIRO, (2000), Fly ash concrete in marine environments, from fly ash reference data sheet no. 6.2000, Research report bre no. 062.

ES, DNIT, (2006), Patologias do concreto – Especificação de serviço, Diretoria de planejamento e pesquisa / IPR, Norma DNIT 090/2006.

Ferreira, Rui Miguel;(2006), Optimização da vida útil das estruturas de betão armado, 4ª jornadas portuguesas de engenharia de estruturas JPEE.

Ferreira, Rui Miguel;(2002), Avaliação de ensaios de durabilidade do betão, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães.

Fernandes, Isabel;(2008), Fórum de inovação e normalização, Agregados Reactivos, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

Gode, Kristaps; Paeglītis, Ainārs; (2009), Investigation of environmental influence on carbonation and chloride ingress in concrete bridge structures.

Gomes, Abdias Magalhães et al; (2003), Permeabilidade do concreto: Um estudo para a avaliação “in situ” usando instrumentos portáteis e técnicas tradicionais, PANNOT.

Gonçalves,A.; (2007), Materiais em ambiente marítimo, Modelação da durabilidade do betão segundo a especificação LNE E465, LNEC.

Guimarães, André T. C. et al;(2003), Intensidade de ataque de cloretos: Considerações sobre a distância do concreto em relação à água do mar.

Ghafar, A. et al;(2010), Universiti Sains Malaysi, Treatment of salt attack and rising damp in heritage buildings in penang, Malaysia, Journal of construction in developing countries, vol. 15(1), 93–113 pp.

Glasser, Fredrik P.et al;(2008), Durability of concrete — Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions, Department of Chemistry; University of Aberdeen, UK, CRIB- Department of Civil Engineering, Laval University, Canada; Simco Technologies, Canada, Cement and concrete research 38, pp 226–246.

Hime, William G.; Mather, Bryant; (1999), “Sulfate attack,” or is it?, Cement and Concrete Research 29, 789–791 pp.

Hobbs,D.W.; (1998), Minimum requirements for durable concrete, Carbonation and chloride-induced corrosion, freeze-thaw attack and chemical attack, British Cement Association.

Iliescu, Marcelo; (2006),Recuperação de estruturas deterioradas por corrosão, RRE/Corrosão, 17/2/2006.

Jorge, Marcello et al; (2002), Ataque do concreto compactado com rolo por águas puras, Universidade Federal de Goiás, Brasil.

Kaefer, Luíz Fernando;(2000), Considerações sobre a microestrutura do concreto.

Kumar, Mehta P.; Monteiro,Paulo J. M.; (2006), Concrete Microstructure, Properties, and Materials, Third Edition, McGraw-Hill.

Lança, Pedro;(2007), Materias de construção, apoio à disciplina de Eng. Civil, 2º ano, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Beja.

Lauer, K. R.; (1990), Damage classification of concrete structures, classification of concrete damage caused by chemical attack, Materials and structures, Rilem Technical Committees 104-DCC, 23,223-229 pp.

Lauer, K.R.:(1990), Classification of concrete damage caused by chemical attack, Department of Civil Engineering, University of Notre Dame, USA.

LNEC;(2001), Cimento, Composição, especificações e critérios de composição para cimentos correntes, Especificação NP EN197-1 – LNEC.

LNEC; Dimensionamento de estruturas de betão de acordo com os eurocódigos, especificação LNEC E465.

LNEC; (2006), Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos setembro 2006, Especificação LNEC E471.

Lo, Tommy;(2005), Carbonation chloride penetration of concrete structures, University of Hong Kong, Annual Concrete Seminar.

Lima, Maryangela Geimb; (2006), Durabilidade de estruturas de concreto em ambiente marinho – Importância dos estudos envolvendo microclima, SP, Brasil.

Lúcio, Válter; (2006), Estruturas de betão armado I, Durabilidade, FCT-UNL.

Medeiros, M. H. F. et al; (2010), Influência da altura e posição da edificação na penetração de cloretos: Estudo de caso em obra no Rio de Janeiro – Brasil, VI Congreso internacional sobre patología y recuperación de estructuras, Argentina.

Mesquitam, C.;Silva , V. Córias; (2006), Qualificação dos agentes e metodologias de inspeção e ensaio de estruturas de betão.

Mesquita, Carlos et al; (2006), Inspeção de estruturas de betão armado deterioradas por corrosão das armaduras.

Mendonça,Luís Iiegas;(2005), Durabilidade de estruturas de betão armado, degradação do betão e corrosão de armaduras, importância da inspeção periódica, “Arte e Cimento”, nº 37, out., pp. 70-73.

Meijers, S. J. H. et al; (2005), Computational results of a model for chloride ingress in concrete including convection, drying-wetting cycles-and carbonation, available online at www.rilem.net, materials and structures 38 (march 2005) 145-154 pp.

Molin, Dal et al; (2001), Estudo de concretos com adição de sílica ativa (microsílica), frente ao ataque de agentes agressivos para emprego em pisos especiais.

Monteiro, Eliana Barreto; (2005), Causas da corrosão, fatores desencadeadores e fatores acelerantes.

Mork,J. H. et al; (2004), Controlo de corrosão em pontes e parques de estacionamento, Encontro nacional de betão estrutural.

Neville,A.; (2006), Concrete, Neville’s Insights and Issues, Thomas Telford.

Nogueira, Sylvio Rocha;(2005), Corrosão em armaduras estruturais.

O'Connell, M. et al; (2010), Biochemical attack on concrete in wastewater applications: a state of the art review, Contents lists available at sciencedirect cement & concrete composites journal homepage: www.elsevier.com/locate/cemconcomp, School of Architecture, Landscape and Civil Engineering, University College Dublin, Newstead, Belfield, Dublin, Ireland.

Park, K. P. et al; (2008), Magnesium sulfate attack of mortars containing GGBFS with different fineness levels, The 3rd ACF International Conference ACF/VCA.

Pereira, Thiago Ramos; (2003), Corrosão em armaduras de concreto.

Pina, João;(2007/2008), Efeitos estruturais da corrosão das armaduras no comportamento de estruturas de betão, IST.

Pinto, Jaques;Takagi, Emílio Minoru; (2007), Sistemas de impermeabilização e proteção para obras de saneamento.

Revestimento elástico para protecção de elementos de betão contra a carbonatação, Ficha Técnica – Imperlastic, Fachadas DC-FT-124-00.

Revista Química Nova na Escola; (2004), Corrosão, Um exemplo usual de fenómeno químico, Revista Química Nova na Escola, n° 19, Maio 2004.

Rodrigues,A. et al; (2010), Revista electrónica de ciências da terrageosciences on-line jornal, GEOTIC – sociedade geológica de Portugal, VIII Congresso Nacional de Geologia,

Rodrigues, M. Paula;(2007), Seminário LNEC, Materiais em ambiente marítimo, produtos de pintura para protecção superficial do betão, Metodologias de avaliação e selecção, Funchal, Outubro de 2007.

Roque, J. A.; Júnior,Moreno;(2005), Considerações sobre vida útil do concreto, 1º encontro nacional de pesquisa-projeto-produção em concreto pré-moldado, Campinas - SP, Brasil.

Ribas, Silva M.:(2003), International RILEM conference on Microbial Impact on Building Materials, RILEM Publications S.A.R.L..

Ribeiro, Fábio Henrique; Corrosão das Armaduras, MSC. CEULP/ULBRA, Curso de Engenharia Civil, Disciplina: Construção Civil IV.

Ryan, Mick; (1999),Sulphate attack and choride ion penetration: Their role in concrete durability, QCL Group of Companies.

Santhanam, Manu; (2001), Sulfate attack research - whither now?Cement & concrete composites 25, 401–407 pp, review.

Santos, Miguel Barreto; Brito, Jorge; (2008), O panorama nacional das reacções álcalis-sílica em betões.

Santos, A. Santos.; (2007), Reacções expansivas no betão, Seminário, Materiais em ambiente marítimo, LNEC.

Santos, A. Santos.; (2007), Materiais em ambiente marítimo, Reacções expansivas no betão, Seminário LNEC.

Santos, A. Santos.; (2010), As reacções expansivas internas no betão, Prevenção dos riscos e gestão das estruturas afectadas, LNEC.

Santos, A. Santos. et al; (2010), As reacções expansivas internas no betão, Prevenção dos riscos e gestão das estruturas afectadas, Workshop LNEC.

Silva, A. Santos et al; (2010), Workshop - as reacções expansivas internas no betão. Prevenção dos riscos e gestão das estruturas afectadas, LNEC.

Schneider, U.; Chen, S.W.; (2005), Deterioration of high-performance concrete subjected to attack by the combination of ammonium nitrate solution and flexure stress, Cement and concrete research 35, 1705– 1713 pp.

Scrivener, K. L.; Young, J. F.; (1995), Mechanisms of Chemical Degradation of Cement-based Systems, E & FN Spon.

Sepúlveda, Jacinto; (2007), Corrosão das armaduras.

Sutter, Lawrence; (2008), The deleterious chemical effects of concentrated deicing solutions on Portland cement concrete, Technology transfer outreach publication.

Skalny, J. et al; (2002), Sulfate Attack on Concrete, Spon Press.

Swamy, R.N.; (1992), The Alkali-Silica Reaction in Concrete, Blackie (Glasgow and London), Van Nostrand Reinhold (New York), 2003.

Taylor, H.F.W.; (1990), Cement chemistry, 2nd edition, Thomas Telford.

The science corner, Sulphuric acid attack on concrete tanks, by: iggy ip, b.a.sc., e.i.t. Waterloo Biofilter Systems Inc. (2006).

Tracy, Robert; (2005), Guide to Underwater Repair of Concrete, Reported by ACI Committee 546.

Tommasell, M. A.G. et al; (2006), O emprego de molibdato de sódio no concreto contra o ataque da chuva ácida, 17º CBECIMAT - Congresso brasileiro de engenharia e ciência dos materiais, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

Ulm, Franz-Josef; Monitoring the durability, performance of concrete in nuclear waste containment, M.I.T., Technical progress report nº4.

Ulm, Franz-Josef et al; (2000), Thermo-Chemo-Mechanics of ASR expansion in concrete structures.

Yokota, H., et al; (2008), Chloride ingress in cracked concrete with water repellent treatment, The 3rd ACF International conference - ACF/VCA.

Zapla, Leonardo Silva et al; (2008), Corrosão galvânica por meio da fixação de estrutura metálica para veiculação de propaganda em fachadas e empenas das edificações.

• **Páginas web consultadas:**

<http://www.wikipedia.com> (visitado frequentemente durante a elaboração desta dissertação)

<http://www.fib-international.org/> (visitado em 10/02/2010)

<http://www.ecivilnet.com> (visitado em 10/02/2010)

<http://www.rc.unesp.br> (visitado em 17/03/2010)

<http://www.allbusiness.com/> (visitado em 22/04/2010)

<http://www.sciencedirect.com> (visitado em 10/02/2010)

<http://www.construcaoereforma.com.br/> (visitado em 10/02/2010)

<http://www.cimentoitambe.com.br/> (visitado em 11/02/2010)

<http://www.casadagua.com.br/> (visitado em 22/04/2010)

<http://www.weberquartzolit.com.br/> (visitado em 17/03/2010)

<http://www.penetrone.com.br/> (visitado em 05/03/2010)

<http://www.revistatechne.com.br/> (visitado em 10/02/2010)

<http://www.cimentoitambe.com.br/> (visitado em 15/05/2010)

<http://www.ecivilnet.com/> (visitado em 10/02/2010)

<http://www.bio-architettura.org/> (visitado em 05/03/2010)

<http://www.altoqi.com.br/> (visitado em 18/04/2010)

<http://filer.case.edu/slr21/Bridge/index.htm> (visitado em 10/02/2010)

<http://www.rc.unesp.br> (visitado em 18/04/2010)

<http://www.allbusiness.com/manufacturing/nonmetallic-mineral-product-manufacturing/968044-1.html> (visitado em 22/04/2010)

<http://www.cosasco.com/corrosometer-probe-p-74-l-en.html> (visitado em 02/03/2011)

• **Fontes das figuras:**

[01] - Fotografia:

<http://en.structurae.de/files/photos/haer/016300pv.jpg>

[02] - Fotografia:

<http://www.engenhariacivil.com/imagens/pre-esforcando-viga.jpg>

[03] - Ferreira, R.M.; (2004) Probabilistic-based durability analysis of concrete structures in marine environment, Doctoral Thesis, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal. ISBN 972-8692-16-1, pp.321.

[04] - Fotografia:

<http://img.alibaba.com/photo/223707786/Clinker.jpg>

[05] - Fotografia:

<http://www.agracadaquimica.com.br/imagens/artigos/GipsitaEZ.jpg>

[06] - Fotografia:

<http://www.mercosul.com/upload/photos/3/3419-7.jpg>

[07] - Fotografia:

http://1.bp.blogspot.com/_SC86xkEjGik/TI7Nkv6ej9I/AAAAAAAAACA8/eRm6kgOsbT8/s1600/cimentoH2.jpg

[08] - Fotografia:

<http://sed.com.sapo.pt/siltito.gif>

[09] - Fotografia:

http://3.bp.blogspot.com/_HBuPSg7beNE/TQ565S_xaUI/AAAAAAAAAAv4/vSAZcyoJzWA/s1600/DSC_0430.JPG

[10] - Fotografia:

http://lh6.ggpht.com/_WLixchEZ7_U/S23B2_m5ExI/AAAAAAAAABPc/tfgjT7KMjik/P1110106.JPG

[11] - Fotografia:

http://le.sanchez.blog.uol.com.br/images/IMG_0890.jpg

[12] - Fotografia:

http://3.bp.blogspot.com/_UF_11dATmJY/S7ohL7xT-RI/AAAAAAAAACmQ/xL1J4R9RZXk/s1600/IMAG0008.JPG

[13] - Fotografia:

<http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/pccp/04150/images/fig106.gif>

[14] - Fotografia:

http://1.bp.blogspot.com/_fWA5cGrG9Cc/TUbwyuoyWdI/AAAAAAAAABo/hVgm_2tIm8o/s1600/Viaduto+Flamboyant+04.JPG

[15] - Coutinho, Maria J. A. R.; (2005), Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem, FEUP edições,

[16] - Coutinho, Maria J. A. R.; (2005), Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem, FEUP edições,

[17] - Fotografia:

<http://rpmedia.ask.com/ts?u=/wikipedia/en/thumb/d/df/AvonDam.JPG/180px-AvonDam.JPG>

[18] -Rogers, J. David; (2004), Dams and Disasters: A brief overview of dam building triumphs and tragedies in California's past, Department of Geological Engineering University of Missouri-Rolla.

[19] - Fotografia:

http://3.bp.blogspot.com/_UF_11dATmJY/S9XQWJvDe_I/AAAAAAAAACnM/M7hB2Ut1ibg/s1600/DSC_100147.JPG

[20] - Fotografia:

http://www.ozcoasts.org.au/indicators/images/concrete_ASS.jpg

[21] - Fotografia:

http://www.aegconstrucoes.com.br/imagens.php?num=12&legenda=Vista_de_um_furo_submerço.

[22] - Catálogo RepairBusiness, TOTAL – Controlo da corrosão em concreto armado e protendido, produtos para reparação, Rogertec®.

[23] - Fotografia:

<http://www.kanapipeline.com/images/storm-drain-structure.JPG>

[24] - Fotografia:

<http://bauerepoxies.com/assets/images/Lihir-102.jpg>

[25] - Fotografia:

<http://www.iparkit.com/images/Picture006.jpg>

[26] - Fotografia:

http://3.bp.blogspot.com/_j8STwsuMEXA/TWJq9dyBj3I/AAAAAAAAALkw/n0Ddimv3zdM/s1600/IMG0008.JPG

[27] - Fotografia:

<http://www.sunwahhk.com/html/images/product/PlastilinePipes.png>

[28] - Fotografia:

<http://icc.ucv.cl/hormigon/sulfato.jpg>

[29] -Schneider,U.;Chen, S. W.; (2004) Deterioration of high-performance concrete subjected to attack by the combination of ammonium nitrate solution and flexure stress, Cement and concrete research 35, 1705– 1713 pp.

[31] - Fotografia:

http://www.agrocim.com.br/imgs/imgfixa/tecnologia_e_mercado/biotecnologia/calcario.jpg

[32] - Fotografia:

<http://www.es.gov.br/site/arquivos/imagens/2010/08/esgpatrickmonteiro090810.jpg>

[33] -Glasser, Fredrik P. et al; (2007), Durability of concrete, Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions.

[34] -Lança,Pedro; (2007), Materiais de Construção, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Beja.

[35] - Cascudo, O.; (1997), O Controle da corrosão de armaduras em concreto. São Paulo: Pini, 1997. 237p.

[36] - Figueiredo, E. P. et al; (1994), Assim Caminha a Corrosão. Técnica, nº 10, p. 28-33.

[37] - Fotografia:

http://www.efcweb.org/efcweb_media/Bilder/WP11/Betonierfehler.jpg

[38] - Fotografia:

<http://www.peritos.eng.br/ferramentas/imagens/corpo2.jpg>

[39] -Fernandes, S. M.; (2006), Determinação da profundidade de carbonatação de betões, argamassas ou outros materiais cimentícios, 1 F 029, Pág.: 2 / 2.

[40] - Fotografia:

<http://www.gardco.com/pages/hardness/schmidthammer.cfm>

[41] -Glasser, Fredrik P. et al;(2007), Durability of concrete, Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions.

[42] - Fotografia:

http://www.cosasco.com/images/650c_corrosion_monitoring_concrete_probe.jpg

[43] - LNEC; (2010) Workshop - As reacções expansivas internas no betão. Prevenção dos riscos e gestão das estruturas afectadas, LNEC.

[44] - Fotografia:

<http://www.sabiah.com/moduloengenharia/G75.gif?pid=75>

[45] - Fotografia:

<https://webspaces.utexas.edu/juengerm/lab/Image04.JPG>

[46] - Hobbs, D. W.; (1988), Alkali-silica reaction in concrete, University of Michigan, Telford, 1988 ISBN 0727713175, 9780727713179.

[47] -Silva, A. Santos; (2007), Seminário LNEC, Materiais em ambiente marítimo, Reacções expansivas no betão, Funchal 22 e 23 de outubro de 2007.

[48] -Dent, Glasser L. S. ; Kataoka N.; (1981), "A reply to J. Bensted's discussion of "the chemistry of alkali-aggregate reaction", Cement and Concrete Research, vol.11, pg. 809-810.

[49] - ASTM C1260 - 07 Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), disponível em: <http://www.astm.org/Standards/C1260.htm>

[50] - Fotografia:

<http://www.hpcbridgeviews.com/images/crack%20due%20to%20ASR.jpg>

[51] - Soares, Dora Cristina Marques et al; (2008), Estudo da influência de adições minerais na inibição da formação de etringite retardada no betão - Resultados preliminares. Trabalho efectuado no âmbito do estudo PIP 2005-2008 "Reacções expansivas internas no betão. Prevenção e mitigação dos seus efeitos" e do Projecto FCT PTDC/CTM/65243/2006 EXREACT- Mitigação de reacções deletérias expansivas internas em estruturas de betão. Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2008.

[52] - Fotografia:

<http://www.engenhariacivil.com/imagens/not0412.jpg>

[53] - Workshop LNEC; (2010), As reacções expansivas internas no betão. Prevenção dos riscos e gestão das estruturas afectadas,LNEC.

[54] - Manual da Gerdau; (2004), Coletânea do Uso do Aço, edição 2004.

[55] - Fotografia:

<http://i29.tinypic.com/e5r3uq.jpg>

[56] - Zapla, Leonardo Silva et al; (2008), Corrosão galvânica por meio da fixação de estrutura metálica para veiculação de propaganda em fachadas e empenas das edificações.

[57] - Fotografia:

http://farm4.static.flickr.com/3286/3021632233_b351c71923_o.jpg

[58] -Appleton, Júlio, Costa, António; (2007), Degradação de estruturas por reacções expansivas de origem interna, Caso de estudo: Viaduto Duarte Pacheco em Lisboa.

[59] - Fotografia:

http://www.peri.pt/shared/references/img/peri_up_viaduto_duarte_pacheco_2_lg.jpg

• Referências:

- (01) - Andrade, J. J. O.;(1996), Estudo das Manifestações Patológicas nas Estruturas de Concreto Armado na Região Nordeste.
- (02) -Telford, Thomas;(1992), Durable Concrete Structures , CEB, CEB Bul. 183.
- (03) -Coutinho, A. de Sousa; (2006), Fabrico e propriedades do betão, LNEC, ISBN: 9789724903262.
- (04) -Ferreira, Rui Miguel; (2006), Otimização da vida útil das estruturas de betão armado.
- (05) - Artigos E - Civil (www.ecivilnet.com/artigos/cimento_portland.htm), Cimento Portland (2010).
- (06) - Wikipédia,(www.wikipedia.com), Cimento,artigos (2010).
- (07) - Especificação NP EN197-1 – LNEC;(2001), Cimento: Composição, especificações e critérios de composição para cimentos correntes, LNEC.
- (08) -Lúcio, Válter; (2006), Estruturas de betão armado I, fct – UNL.
- (09) -LNEC; (2007), Especificações relacionadas com a norma LNEC NP EN 206-1:2007, LNEC.
- (10) - Helene, P.; (2001). Introdução da vida útil no projeto das estruturas de concreto NB/2001. WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES. Novembro - São José dos Campos.
- (11) -Lauer, K.R.; (1990), Classification of concrete damage caused by chemical attack, Department of Civil Engineering, University ofNotre Dame, USA.
- (12) -Glasser,Fredrik P. et al; (2007), Jacques Marchand, Eric Samson, Durability of concrete, Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions.
- (13) -Ryan, "Mick"; (1999),Sulphate attack and choride ion penetration: Their role in concrete durability, QCL Group of Companies.
- (14) -Creegan,Patrick J. et al; (2008),Erosion of Concrete in Hydraulic Structures, Reported by ACI Committee 210.
- (15) -Jorge,Marcello et al; (2002), Ataque do concreto compactado com rolo por águas puras.
- (16) -Baron,Jacques ;Sauterey, Raymond ;(1982), Le beton hydraulique - Connaissance et pratique, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, ISBN: 2-85978-033-5.
- (17) - Wilbur J.;Watson, Sara Ruth; (2010), Bridge Rehabilitation Topics and News.

- (18) -Gomes,Abdias Magalhães et al; (2003), Permeabilidade do concreto: Um estudo para a avaliação “in situ” usando instrumentos portáteis e técnicas tradicionais(2003).
- (19) -Allen,William et al; (2005),Guide to Underwater Repair of Concrete, Reported by ACI Committee 546(2005).
- (20) -Ross, Matt W, et al; (1982), Cement Composition and Concrete Durability in Sea Water, Technical, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, July 1982.
- (21) -Lima,Maryangela Geimba et al; (2001), Durabilidade de estruturas de concreto em ambiente marinho – importância dos estudos envolvendo o microclima.
- (22) - Morelli, F., Lima, M. G.; (2004),Caracterização da agressividade do ambiente marinho às estruturas de concreto. In: SEMENGO, Rio Grande. Anais [CD Rom]. Rio Grande, FURG.
- (23) -Rodrigues,A. Et al; (2010), Caracterização de produtos de deterioração do betão por métodos petrográficos.
- (24) -Castro,José;Martins, João Guerra; (2006), Patologia do betão reparação e reforço de estruturas.
- (25) - O’Connell,M.; (2009), Biochemical attack on concrete in wastewater applications: A state of the art review, School of Architecture, Landscape and Civil Engineering, University College Dublin, Newstead, Belfield, Dublin 4, Ireland.
- (26) -Hime, William G.;Mather, Bryant; (1999),“Sulfate attack,” or is it?, Cement and Concrete Research 29, 789–791 pp.
- (27) -Santhana, Manu et al; (2000),Sulfate attack research – whither now? Cement and Concrete Research, Review.
- (28) -Filho, Júlio de Mesquita; (2010), Artigos, nitratos,Universidade Estadual Paulista.
- (29) -Schneider,U.;Chen, S.-W.; (2005), Deterioration of high-performance concrete subjected to attack by the combination of ammonium nitrate solution and flexure stress, Cement and concrete research 35, 1705– 1713 pp .
- (30) - Davies, Ron;(2005), Concrete service in aggressive industrial environments.
- (31) - Not for use in concrete design SD1, (2005), Part B - Draft 1 v5, Draft.
- (32) -Taylor,H.F.W.; (1997), Cement chemistry, 2nd edition, ISBN: 0 7277 2592, University of Aberdeen.
- (33) -Pereira, Thiago Ramos; (2003), Corrosão em Armaduras de Concreto.

- (34) -Mendonça,Luís Viegas; (2005),Durabilidade de Estruturas de Betão Armado, Degradação do Betão e Corrosão de Armaduras, Importância da Inspeção Periódica, “Arte e Cimento”, nº 37, Out. 2005.
- (35) -Especificação E391, (1993), Determinação da profundidade de carbonatação de betões, argamassas ou outros materiais cimentícios, LNEC.
- (36) -Bremner,Theodore et al; (2007),Protection of Metals in Concrete Against CorrosionACI 222R-01, Reported by ACI Committee 222(2007).
- (37) -Ribeiro, Fábio Henrique de Melo; (2006),Corrosão das armaduras, CEULP/ULBRA, Curso de engenharia civil, Disciplina: Construção Civil IV.
- (38) - Wikipédia (www.wikipédia.com),(2010), Ião Cloreto, artigos.
- (39) -Meijers,H. et al; (2003), Computational results of a model for chloride ingress in concrete including convection, drying-wetting cycles-and carbonation concrete design.
- (40) - <http://www.cosasco.com/corrosometer-probe-p-74-1-en.html>, (2010)
- (41) -WorkshopLNEC; (2010), As reacções expansivas internas no betão. Prevenção dos riscos e gestão das estruturas afectadas,LNEC.
- (42) -LNEC; (2006), Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de ligantes hidráulicos,LNEC.
- (43) -Swamy, R.N.; (1992),The Alkali-Silica Reaction in Concrete, Blackie (Glasgow and London), Van Nostrand Reinhold (New York), 2003.
- (44) -Santos,Miguel Barreto; Brito, Jorge; (2008),O panorama nacional das reacções álcalis-sílica em betões.
- (45) -Collepari, M.; (2003), A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete, Cement& Concrete Composites 25, 401–407 pp.
- (46) -Zapla,Leonardo Silva et al; (2008), Corrosão galvânica por meio da fixação de estrutura metálica para veiculação de propaganda em fachadas e empenas das edificações.
- (47) -Appleton, Júlio;Costa, António; (2007),Degradação de estruturas por reacções expansivas de origem interna, Caso de estudo: Viaduto Duarte Pacheco em Lisboa.

7 – Anexos.

Anexo 1

- Normas Portuguesas:
 - NP 411 – Água. Determinação do valor do pH;
 - NP 413 – Água. Determinação do teor em sulfatos;
 - NP 421 – Águas. Determinação da alcalinidade;
 - NP 423 – Água. Determinação do teor em cloretos;
 - NP 1383 – Betões. Preparação de provetes para ensaios de compressão e de flexão;
 - NP 1414 – Águas. Determinação do consumo químico de oxigênio de águas para amassadura e de águas em contacto com betões. Processo do dicromato de potássio;
 - NP 1417 – Águas. Determinação do teor em sulfuretos totais de águas de amassadura e de águas em contato com betões. Método volumétrico;
 - NP 2064 – Cimentos. Definições, composição, especificações e critérios de conformidade;
 - NP EN 196-1 – Métodos de ensaio em cimentos. Determinação das resistências mecânicas;
 - NP EN 196-3 – Métodos de ensaio de cimentos. Determinação do tempo de presa e da expansibilidade.

- Especificações LNEC:
 - E 226 – Betão. Ensaio de compressão;
 - E 379 – Águas. Determinação do teor de ortofosfatos por espectrofotometria. Processo por redução pelo ácido ascórbico;
 - E 380 – Águas. Determinação do resíduo em suspensão, do resíduo dissolvido e do resíduo total;
 - E381 – Águas. Determinação dos teores de sódio e de potássio por fotometria de chama;
 - E 382 – Águas. Determinação do teor em nitratos. Método de redução com a liga de Devarda;
 - E417 – Águas. Determinação do teor de zinco.