

José Hermenegildo Teixeira Gomes

**Factores de Degradação Química do Betão**

UNIVERSIDADE FERNANDO PESSOA

PORTO

SETEMBRO 2008



José Hermenegildo Teixeira Gomes

**Factores de Degradação Química do Betão**

UNIVERSIDADE FERNANDO PESSOA

PORTO

SETEMBRO 2008

José Hermenegildo Teixeira Gomes

**Factores de Degradação Química do Betão**

“Monografia apresentada à Universidade Fernando Pessoa  
Como parte dos requisitos para a obtenção do grau de  
Licenciatura em Engenharia Civil”

---

## Sumário

É imensa a variedade de patologias que prejudicam as construções e muitas deles podem surgir da má concepção de um modo geral, ou seja, a nível do projecto de arquitectura até as soluções estruturais adoptadas, incluindo também à possível execução defeituoso dos elementos construtivos ou somente à má propriedade dos produtos que foram escolhidos ou ao modo de envelhecimento natural dos materiais.

Temos o caso da resistência do betão, que ao ataque químico está de uma aspecto comum relacionado com a porosidade, a constituição do cimento usado na fabricação do betão e as situações das quais endureceu. Assim sendo, nesta monografia observar-se os factores de degradação química do betão, que se trata de uma das principais patologias do betão, designadamente por patologias químicas.

Através de alguns elementos recolhidos, identificaram-se e analisaram-se os principais factores de degradação e por fim, apresenta-se algumas soluções de prevenção possíveis.

## ÍNDICE

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>CAPÍTULO I - CARBONATAÇÃO</b> .....	3
1.1 Método analítico de determinação da profundidade de carbonatação.....	4
1.2 Métodos experimentais de determinação da profundidade de carbonatação .....	5
<b>CAPÍTULO II - ATAQUE DE CLORETOS (CL)</b> .....	7
2.1 Principais Fontes de Cloretos .....	8
2.2 Métodos de análise da penetração de cloretos.....	9
2.3 Medidas de prevenção do ingresso de cloretos no betão.....	10
<b>CAPÍTULO III – REACÇÕES DOS ÁLCALIS</b> .....	12
3.1 Reacção álcalis-inerte .....	13
3.2 Factores condicionantes da reacção álcalis-inerte.....	14
3.3 Reacções álcalis-sílica (RAS).....	16
3.4 Reacções álcalis-silicato .....	18
3.5 Reacção álcalis-carbonato .....	18
3.6 As causas que condicionam o desenvolvimento da RAS .....	19
3.7 Métodos de prevenção e reparação.....	20
<b>CAPÍTULO IV – ATAQUE DE SULFATOS</b> .....	23
4.1 Mecanismos de ataque de sulfatos.....	25
4.2 Papel dos agregados no ataque dos sulfatos .....	29
4.3 Medidas de prevenção de ataques de sulfatos .....	30
<b>CAPÍTULO V – ATAQUE DE ÁGUA, ÁCIDO E EXPOSIÇÃO AOS SAIS</b> .....	31
5.1 Água Pura .....	31
5.2 Estragos provocados pela água do mar.....	31
5.3 Ataque Ácido.....	32
5.4 Ataque devido à exposição de sais .....	34
<b>CONCLUSÃO</b> .....	35
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	36
<b>BIBLIOGRAFIA DIGITAL</b> .....	36

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos de aplicação da solução indicador de Fenolftalaina.....	5
Figura 2 – Diagrama em árvore do mecanismo de corrosão da armadura .....	7
Figura 3 – Pilar apresentando degradação na base com fácil remoção de concreto e presença de corrosão acentuada.....	8
Figura 4 - Exemplo de um perfil de cloretos como percentagem da dosagem de cimento em peso.....	9
Figura 5 - Distribuição dos recursos geológicos nacionais fontes de álcalis (a) e de formas de sílica potencialmente reactiva (b) .....	15
Figura 6 - Reacção álcalis-sílica reactiva. Estados de alteração (1 a 4) de quartzo-filoneano em gel. ....	16
Figura 7 – Esquema do efeito da reacção álcalis-sílica reactiva .....	17
Figura 8 – Deterioração do betão por reacções álcalis-sílica reactiva.....	20
Figura 9 - Degradação de uma manilha de betão por ataque por sulfatos.....	23
Figura 10 - Efeito de ataques por sulfatos .....	24
Figura 11 – Imagem da etringite ao microscópio electrónico .....	25
Figura 12 - Microfissura provavelmente causada por formação retardada de etringite num provete de betão de 21 anos.....	26
Figura 13 - Betão sujeito ao ataque por sulfatos com formação de taumasite chega a transformar-se num material friável, separável à mão .....	28
Figura 14 – Concentração média de iões na água do Atlântico.....	32

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Relação entre HR e velocidade de concentração .....4  
Tabela 2 – Ácidos que causam ataque químico no betão .....34

## INTRODUÇÃO

O termo betão aplica-se a um aglomerado artificial, onde os agregados quando misturados com cimento e água se transformam numa massa sólida.

O betão é um dos mais versáteis e mais usados materiais na construção, tendo uma enorme durabilidade quando correctamente produzido (capacidade das estruturas ou materiais, de cumprirem as funções para as quais foram projectados durante o seu tempo de serviço) e desde que sujeito a condições normais de exposição. Como prova disso temos inúmeras construções realizadas nos últimos 100 anos, onde foi utilizado o betão, e que ainda hoje estão em bom estado de funcionamento.

No entanto, durante muitas décadas, as estruturas de betão eram consideradas como sendo praticamente indestrutíveis, e o betão considerado como um material ao qual não seria necessário efectuar qualquer tipo de manutenção. Esta imagem foi-se alterando nas últimas décadas, quando nos E.U.A., onde existem estruturas mais antigas do que na Europa, se começaram a gastar milhões de dólares na reabilitação de edifícios degradados.

Sabemos, hoje, que o betão não é imune por exemplo a substâncias químicas, quer estas sejam introduzidas no betão por intermédio dos seus constituintes, ou penetrem no betão através da sua superfície ou de fendas.

As causas da prematura degradação do betão (gradual redução na performance do material) são variadas. As principais são de origem humana, pois nem sempre são aplicadas as melhores e mais adequadas práticas construtivas, não só ao nível do projecto, mas também ao nível da execução. A degradação do betão pode ser também devida a causas naturais, tais como, processos químicos, físicos ou mesmo biológicos.

Neste trabalho vamos apenas tratar dos mecanismos de degradação de origem química, tais como a carbonatação que consiste na reacção dos componentes do betão com o dióxido de carbono, as reacções álcalis-inerte, os ataques de cloretos onde existe uma interacção prejudicial do ião cloreto com as estruturas de betão, entre outros.

Os fluidos agressivos que trespassam para o interior dos poros do betão, são dos maiores problemas provenientes de ataques químicos. Assim sendo, os danos na maior parte das situações provêm da permeabilidade das camadas superficiais e não do betão interior. Os constituintes de um fluido agressivos podem trespassar nos poros do betão como proveniente de três forças (Ferreira, 2000):

- Difusão: resulta da diferença de concentrações iónicas entre um fluido externo agressivo e o fluido interno nos poros do betão.
- Pressão hidrostática: diferenças na pressão dos fluidos em superfícies opostas de um elemento estrutural. A penetração resulta do fluxo hidráulico.
- Forças capilares: o meio líquido penetra nos poros do betão devido a um mecanismo capilar.

De um modo genérico, podem enumerar-se os seguintes fluidos agressivos aos quais o betão pode ser exposto: ácidos minerais, ácidos orgânicos, soluções de sulfatos, cloretos, açúcares, nitratos, fenóis e compostos amoníacos.

A penetração pode igualmente originar da combinação de um série de forças e no qual podem ser influenciadas pelos efeitos de gradientes de temperatura, gelo, carregamentos, corrente eléctrica, ou outros factores (Ferreira, 2000).

Para elaboração deste trabalho procedeu-se à consulta bibliografia, essencialmente por livros de autores reconhecidos nesta área, e também através de alguns sites de Internet, dos quais se encontram todos identificados, quer dos livros quer os sites na respectiva bibliografia.

## CAPÍTULO I - CARBONATAÇÃO

A carbonatação é causada pela penetração de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) atmosférico que ao reagir com a presença de humidade no betão forma ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), o que vai neutralizar a alcalinidade em que se encontrava o betão. Esta reacção que dará origem ao ácido carbónico pode ocorrer em três fases. Na primeira fase o  $\text{CO}_2$  difunde-se para o interior do betão. Na segunda fase, o  $\text{CO}_2$  reage com as moléculas de água, e numa terceira fase, o produto resultante, ácido carbónico, reage com os componentes alcalinos do betão. A carbonatação dá-se lentamente a partir do betão exterior exposto ao  $\text{CO}_2$  e vai avançando para o interior, sendo que à medida que vai avançando a sua velocidade será cada vez mais lenta uma vez que o  $\text{CO}_2$  tem que se difundir através dos sistemas de poros, incluindo a superfície já carbonatada. A velocidade de carbonatação depende da humidade relativa do betão, que por sua vez, varia com a profundidade no betão (Salta e outros, 1996).

A carbonatação dar-se-á mais rapidamente por exemplo em casas de banho, cozinhas e locais com insuficiente arejamento, propícios a um grande teor de humidade. Os parques de estacionamento subterrâneos são também um local de grande incidência de carbonatação, pois há uma elevada concentração de  $\text{CO}_2$ . Outro factor que afecta a carbonatação è a permeabilidade.

A carbonatação por si não causa a corrupção do betão, mas dá origem a danos relevantes, sendo um deles a retracção por carbonatação o que levará à abertura de fendas no betão. Este tipo de retracção pode demorar meses ou mesmo anos a verificar-se. Este processo irá facilitar a infiltração de  $\text{CO}_2$ , o que conduzirá a um abaixamento do pH no betão. Relativamente à durabilidade, a importância da carbonatação está no sucesso de reduzir o pH da água no betão endurecido, a partir de valores de 12.6 a 13.5 para um valor abaixo de 9.0 (Richardson, 1998). Quando todo o carbonato de cálcio estiver carbonatado, o valor de pH é reduzido para 8.3 (Papadakis, 1992).

O aço no meio alcalino do betão, forma uma fina camada de óxido, conhecida como camada de protecção passiva, esta camada protegerá o aço enquanto a água existente no betão tenha um pH alto. Caso não aconteça o pH baixar devido à carbonatação, a camada é eliminada e

surge a corrosão. Por este motivo, é muito importante conhecer a profundidade de carbonatação.

Por exemplo, para um betão com 350 Kg de cimento por m<sup>3</sup>, a profundidade a que chega a carbonatação é de 4 mm em 2 anos, 10 mm em 8 anos, 20 mm em 25 anos (Martins e outros, 2004).

A velocidade com que a carbonatação se desenvolve depende do teor de humidade da estrutura e da humidade relativa nas imediações da estrutura. A carbonatação é grandemente influenciada pela concentração de CO<sub>2</sub>, pelo tipo de cimento, e pela relação água/cimento (A/C) do betão. Para que a carbonatação progrida a humidade deve ser combinada com o CO<sub>2</sub>. Assim, é a humidade relativa do ar que irá determinar a velocidade de carbonatação (Emmons, 1993).

Na Tabela seguinte apresenta-se a variação da velocidade de carbonatação com a humidade relativa do ar.

**Tabela 1 – Relação entre HR e velocidade de concentração - fonte: (Emmons, 1993)**

Humidade relativa do ar (%)	Velocidade de carbonatação
≤ 30	Baixa
40 a 70	Elevada
≥75	Baixa

### 1.1 Método analítico de determinação da profundidade de carbonatação

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

$$c = k \cdot \sqrt{t}$$

Em que:

- c – profundidade de carbonatação;
- k – coeficiente de carbonatação;
- t – tempo em anos.

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

## 1.2 Métodos experimentais de determinação da profundidade de carbonatação

Existem diversos métodos laboratoriais para a determinação da profundidade de carbonatação, a análise química, difracção por raios – X, espectrografia por infravermelhos e análise termogravimétrica. Existe um método mais expedito para a determinação da profundidade de carbonatação, que consiste na utilização de uma solução de fenolftalaina diluída como indicador de alcalinidade.

- **Solução indicadora de Fenolftalaina**



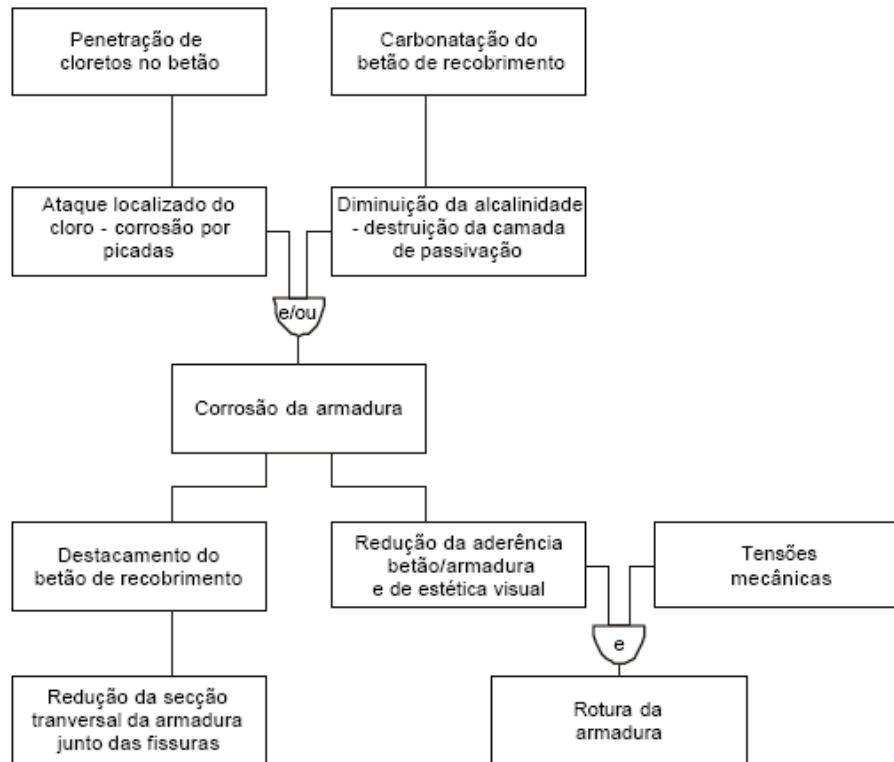
**Figura 1 – Exemplos de aplicação da solução indicador de Fenolftalaina - fonte: Arquivo Pessoal**

Este método consiste na utilização de um indicador de fenolftalaina, que em ambientes alcalinos adquire a cor rosa-carmin. O teste pode ser realizado, aplicando a solução em fendas abertas propositadamente para o efeito, ou, em laboratório utilizando provetes recolhidos do local a testar. Após a aplicação do indicador, podemos observar o aparecimento de zonas com cor rosa-carmim, que nos mostram a frente de carbonatação e consequentemente a profundidade de carbonatação. Quando a profundidade de carbonatação for igual á espessura do recobrimento do betão, a camada passiva de protecção é destruída e dá-se início à corrosão das armaduras.

Este método possui algumas limitações, pois podem existir zonas parcialmente carbonadas que não serão detectadas pela solução de fenolftalaina. Ou seja, podem existir reacções de dióxido de carbono a profundidades superiores à indicada por este teste.

## CAPÍTULO II – ATAQUE DE CLORETOS (Cl<sup>-</sup>)

A presença de cloretos no betão, juntamente com a carbonatação, é uma das causas de deterioração do betão mais comum.



**Figura 2 – Diagrama em árvore do mecanismo de corrosão da armadura - fonte: (Ferreira, 2000)**

Devido aos cloretos têm surgido enúmeras problemas de corrosão em estruturas de betão armada, em muitos países. É preciso bilhões de dólares para compor os prejuízos feitos todos os anos correspondente à corrosão (Ferreira, 2000).

Os cloretos podem existir nos agregados naturais ou serem provenientes da água com os quais estiveram em contacto. Em geral os agregados extraídos do mar contém sais em que predominam os cloretos e os sulfatos.

No entanto, os cloretos não formam compostos indesejáveis com os constituintes do betão simples, apenas alteram o tempo de presa do cimento e a velocidade de endurecimento. Mas no caso do betão armado ou pré-esforçado a degradação do betão dá-se devido ao facto do ião

cloro promover a formação de ferrugem nas armaduras, o que fará com que estas aumentem significativamente de volume, rompendo com o revestimento de betão, e acelerando ainda mais os processos de corrosão (Coutinho, 1999).



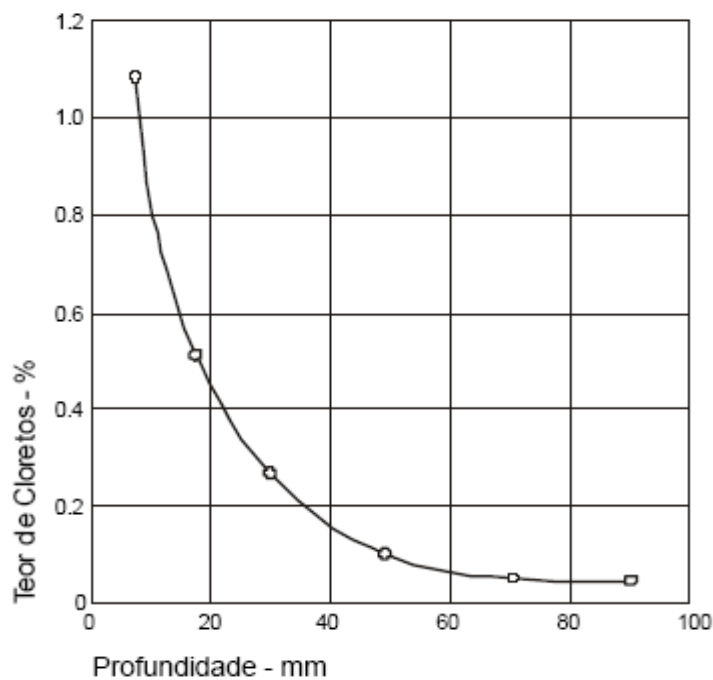
**Figura 3 – Pilar apresentando desagregação na sua base com fácil remoção de concreto e presença de corrosão acentuada - fonte: <http://patologiaestrutura.vilabol.uol.com.br/relatos.htm>**

## 2.1 Principais fontes de Cloretos

Os cloretos existentes no betão podem ser provenientes dos agregados constituintes do betão, da água de mistura ou ainda através da utilização de adjuvantes que contenham cloro tal como cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ), que foi em tempos bastante usado mas devido aos problemas que causava deixou de ser permitido o seu uso no betão. Temos então como principais fontes de cloreto a água do mar, os sais utilizados na remoção de gelo, por exemplo nas estradas, e alguns processos industriais (E 253, 1971).

Quando o betão está constantemente imerso em água, os cloretos penetram no betão até profundidades avultadas, mas se não houver oxigénio junto do cátodo, não haverá corrosão. O betão seco absorve água. Se as condições externas modificarem para secas, a direcção da

deslocação de água inverte-se, evaporando das extremidades dos poros capilares, depositando os sais. Assim, a concentração dos sais na água ainda existentes aumenta junto da superfície do betão. Estabelece-se um gradiente de concentrações que leva os sais na água, junto da superfície para as áreas de menor concentração, ou seja, o interior do betão, sendo este transporte por difusão. A figura acima apresenta o perfil de concentração dos cloretos no betão, após vários períodos de molhagem e de secagem e na figura abaixo verifica-se que o teor de cloretos abranda com o aumento da espessura da camada de recobrimento.



**Figura 4 – Exemplo de um perfil de teor de cloretos como percentagem da dosagem de cimento em peso - fonte: (Neville, 1995)**

A direcção dos ventos é igualmente uma causa que tem interferência na penetração de cloretos, mas para estruturas situadas em ambiente marítimo. As zonas mais protegidas mostram, na maior parte dos casos, maior actividade de penetração de cloretos do que as zonas expostas, pois estas estão mais expostas às chuvas, logo mais lavadas (Salta, 1996).

## 2.2 Métodos de análise da penetração de cloretos

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

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

A influência das condições de exposição nos ensaios in-situ tem um papel muito importante na penetração dos cloretos no betão. Como já foi referenciado acima, geralmente as fachadas localizadas a barlavento contêm mais cloretos do que as fachadas localizadas a sotavento, pois estas estão mais protegidas das chuvas que acabam por ajudar na limpeza dos cloretos que se encontram na face do betão. As condições de exposição são também reguladas pela altura em relação ao nível médio do mar, e também pela distância às praias. Não existem actualmente recomendações no que diz respeito á recolha de amostras para a análise de cloretos no betão, no entanto devemos ter em conta os factores a cima mencionados.

### **2.3 Medidas de prevenção do ingresso de cloretos no betão**

Na prática, a prevenção da corrosão está na verificação da penetração de cloretos pela camada de recobrimento de betão.

Através do uso de determinados materiais cimentícios, reduzem claramente a penetrabilidade do betão, ampliando a sua resistência, portanto reduzindo a velocidade de corrosão. Por exemplo, a aplicação de 9% de sílica de fumo por massa de cimento conduz a uma difusividade do cloro cinco vezes inferior (Neville, 1995).

O tempo que leva o início da corrosão é substancialmente reduzido se a cura for prolongada (Neville, 1995).

Quanto maior for o recobrimento, maior será o tempo essencial para que determinada concentração de iões de cloro alcance a armadura. Logo, a qualidade do betão e a sua espessura do recobrimento actuam reunidos na protecção das armaduras.

### **CAPÍTULO III – REACÇÕES DOS ÁLCALIS**

Só depois dos anos 70 é que se começou a ter conhecimento de estruturas de betão dos mais diversos tipos, tais como barragens, auto-estradas, pontes, piscinas nas quais se começaram a detectar, muitas vezes de uma forma prematura, sinais de degradação tendo como impulsionador as reacções álcalis-inerte expansivas (Reis e outros, 1999).

Os inertes são a maior parte da constituição do betão (70 a 80% do volume do betão) logo estão inteiramente ligados à durabilidade do mesmo, particularmente quando detêm constituintes nocivos (matéria orgânica, cloretos, sulfuretos, argila,...) ou quando têm origem em rochas alteradas ou reactivas aos álcalis (Reis e outros, 1997).

As reacções álcalis-inerte são caracterizadas pelo seu carácter químico que se desenvolvem entre os constituintes reactivos dos inertes e os iões alcalinos e hidroxilos presentes na solução intersticial da pasta de cimento, onde estas podem ter um efeito de aceleração da degradação (Reis e outros, 1997).

Estas reacções têm um carácter fortemente expansivo, sendo a causa do aparecimento de tensão internas no betão e levando a uma conseqüente fissuração do mesmo e frequentemente acompanhadas do aparecimento de eflorescências e transpirações à superfície do betão. Além disso, a fissuração que resulta deste processo pode provocar o aparecimento de outros processos de deterioração, tais como a carbonatação e conseqüente corrosão das armaduras (Reis e outros, 1997).

Os principais factores que condicionam o desenvolvimento das reacções álcalis-inerte no betão são a existência de inertes reactivos, concentração elevada de iões alcalinos na pasta, condições ambientais favoráveis (humidade, temperatura, ciclos de molhagem-secagem) (Reis e outros, 1999).

Portugal tem um clima temperado logo isto leva a um pressuposto que somente algumas regiões do país tivessem as condições ideais, tal como um elevado grau de humidade, seria viável ocorrer a degradação de estruturas aéreas de betão pelas reacções álcalis-inerte (Reis e outros, 1999).

Em Portugal não tem sido dado grande atenção a problemas de reacções-inerte no betão, talvez devido a terem sido detectados até agora relativamente poucos casos de degradação deste tipo (Reis e outros, 1997).

Materiais geológicos que sempre foram considerados como excelentes inertes para o fabrico do betão estão agora a ser postos em causa, pois podem conter constituintes reactivos aos álcalis o que pode implicar as reacções álcalis-inerte. Cada vez é mais importante o conhecimento da aptidão de materiais geológicos para a utilização como inertes do betão e de medidas a fim de reduzir as consequências do seu uso, o que hoje em dia um campo de investigação e de normalização de inegável importância e de interesse económico (Reis e outros, 1997).

Podemos ter essencialmente três tipos de reacção que são: a reacção álcalis-sílica que prevalece em betões com inertes compostos principalmente por quartzitos, liditos e calcários com inclusão do sílex e calcedónia, processa-se geralmente a velocidades relativamente elevadas. A reacção álcalis-silicato, de expansão lenta e retardada, esta é a mais importante em betões com inertes compostos por rochas siliciosas, tais como argilites, filites e grauvaques, e a reacção álcalis-carbonato. Tendo em conta que os tipos de inertes têm sido utilizados em Portugal, grande parte da natureza dos inertes é granítica, logo é previsível que no futuro aumente o número de estruturas degradadas por reacções álcalis-inerte (Reis e outros, 1997).

### **3.1 Reacção álcalis-inerte**

Começou-se a encontrar desde há poucos anos indícios claros da ocorrência de reacções álcalis-inerte (RAI) em diversas estruturas de betão, por exemplo, barragens. A maioria das ocorrências de deterioração por RAI descobertos, pertence à reacção de álcalis-sílica (RAS) do tipo denominado de expansão lenta e retardada, em particular por inertes graníticos (Reis e outros, 1999).

Os tipos de RAI mais frequentes são as reacções álcalis-sílica e álcalis-silicato, conjuntamente juntadas na mesma denominação reacções álcalis-sílica (RAS) (Reis e outros, 1999).

### 3.2 Factores condicionantes da reacção álcalis-inerte

- **Factores climáticos**

O clima em Portugal é temperado atlântico, ou seja, de um modo geral não oferece condições muito favoráveis à ocorrência das reacções álcalis-inerte nas estruturas aéreas. Mas por outro lado existe uma evidente diferença entre o norte e o sul do país e entre o litoral e o interior. No caso particular no que toca á humidade, não deixando de referir que em média a pluviosidade atinge em algumas zonas do norte cerca de 2000mm, já que no sul raramente ultrapassa os 600mm. É de realçar que na zona litoral norte a frequência de queda de chuva é superior atingindo valores na ordem dos 100 dias/ano (Reis e outros, 1999).

De salientar uma maior concentração de elevado potencial hidroeléctrico na zona norte do país e portanto grande número de estruturas hidráulicas de betão está precisamente nesta mesma região, por outro lado é na zona do litoral que existem maior número de estruturas aéreas de betão, como consequência de uma maior concentração populacional (Reis e outros, 1999).

- **Factores litológicos**

Portugal é detentor de uma grande e variado número de rochas, onde as rochas ígneas predominantes (pertencem á família dos granitos e dos gabros, principalmente basaltos) ocupam cerca de 30% do território, já as rochas sedimentares predominantes são os carbonatos (tais como calcários, calcários margosos, margas, calcários dolomíticos e dolomites) que afloram em cerca de 10% do continente, ou são de natureza clástica (especialmente arenitos, areias e argilas) que estão distribuídas por cerca de 20% do território. As rochas metamórficas afloram nos restantes 40% do território (e são compostas essencialmente por xistos, em geral associados a metagrauvaques, quartzitos, mármore e rochas de natureza gnáissica e anfibólica) (Reis e outros, 1999).

Constata-se que a maior frequência de acontecimento de formações geológicas com formas de sílica potencialmente reactiva (sobretudo rochas graníticas, quartzíticas e xisto - grauvaquicas) é mais elevada se distribuírem pelas zonas do Minho, Trás-os-Montes, Beira

Alta e Alentejo, com menos frequência de se encontrarem as formações sedimentares (calcários com sílex, silcretos, diatomitos e aluviões com metapelitos, quartzo cataclástico e calcedónico, etc.) que se encontram distribuídos pelas Beiras, Estremadura e Alentejo, com uma maior incidência na Beira Litoral e Beira Baixa, nas baías do Tejo e do Sado e no litoral algarvio.

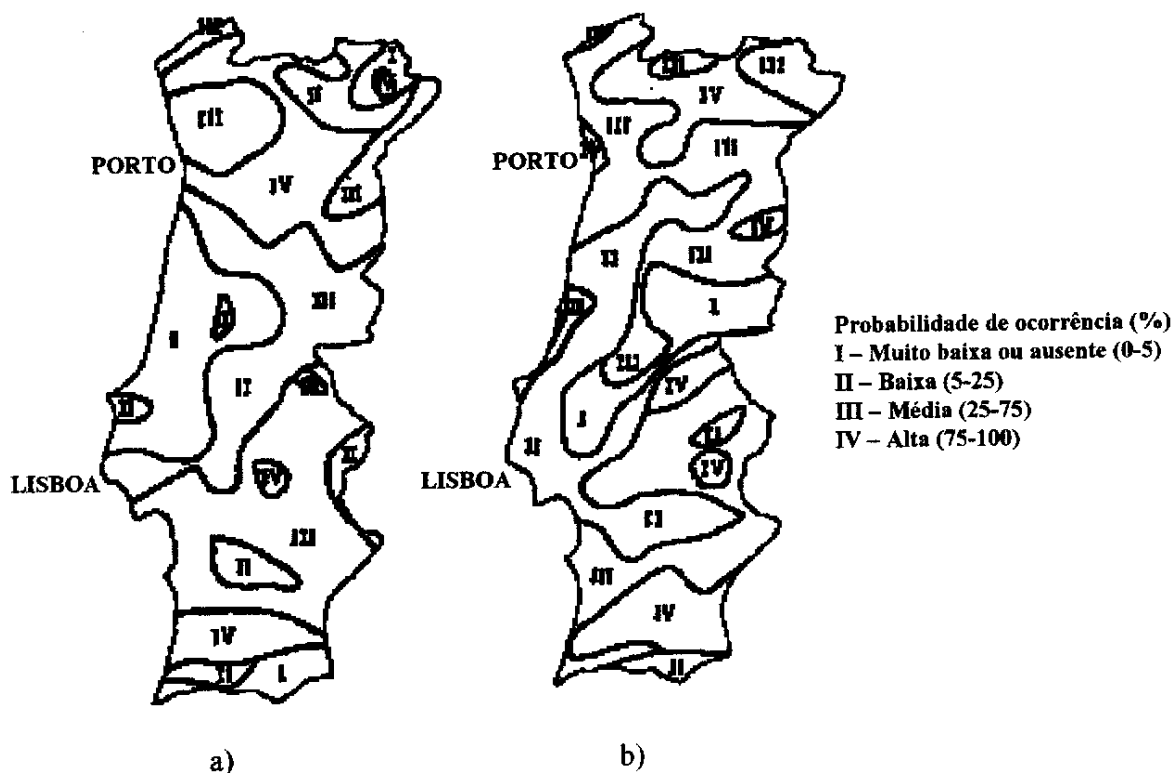


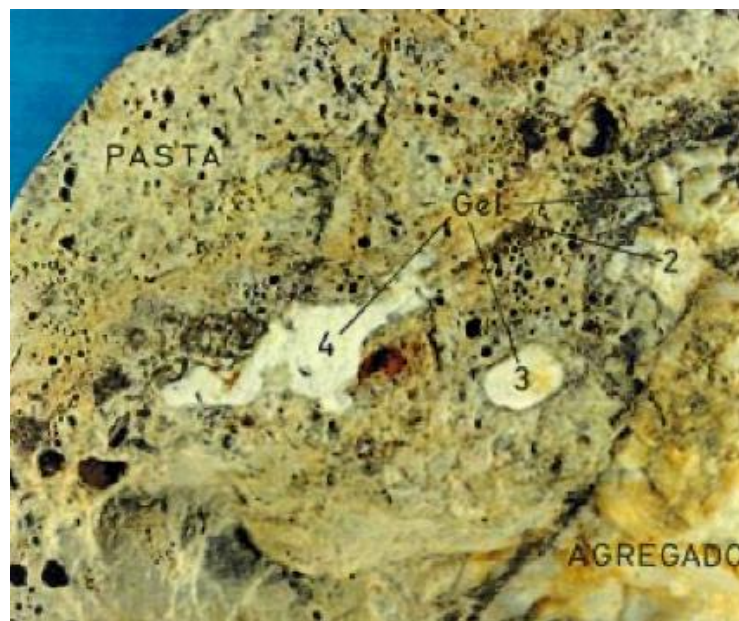
Figura 5 - Distribuição dos recursos geológicos nacionais fontes de álcalis (a) e de formas de sílica potencialmente reactiva (b) - fonte: (Reis e outros, 1999)

As formações geológicas potencialmente fornecedoras de álcalis encontram-se com maior frequência no Minho, na Beira Baixa e no baixo Alentejo, sendo de esperar que a maior contribuição seja sobretudo da família dos granitos, com excepção do Baixo Alentejo, onde predominam os xistos e grauvaques, ou seja, os sienitos e algumas rochas vulcânicas. Poderá chegar-se a uma conclusão que implica uma melhor conjugação dos factores geológicos com os climáticos para o desenvolvimento das reacções álcalis-inerte em estruturas aéreas será mais provável de se verificar no norte do país (Reis e outros, 1999).

### 3.3 Reacções álcalis-sílica (RAS)

A reacção álcalis-sílica é a mais comum e corresponde essencialmente a uma reacção química entre certas formas de sílica reactiva, possuindo uma estrutura mais ou menos desordenada e por isso instável num meio de elevado pH, e os iões alcalinos ( $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ ) e os hidroxilos ( $\text{OH}^-$ ) presentes na solução intersticial da paste de cimento, produzindo um gel de silicato alcalino (Reis e outros, 1997).

Na reacção a velocidade dependerá essencialmente da concentração dos hidróxidos alcalinos na solução intersticial, onde os iões cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), cuja fonte principal é a portlandite (hidróxido de cálcio) formada pelas reacções de hidratação do cimento, penetram rapidamente no gel, originando assim no betão, em torno dos inertes, geles de silicatos de cálcio, sódio e potássio, onde a composição destes geles é variável, dependendo de inúmeros factores, tais como teores iniciais de sílica reactiva e álcalis, onde estes vão evoluindo com o tempo.

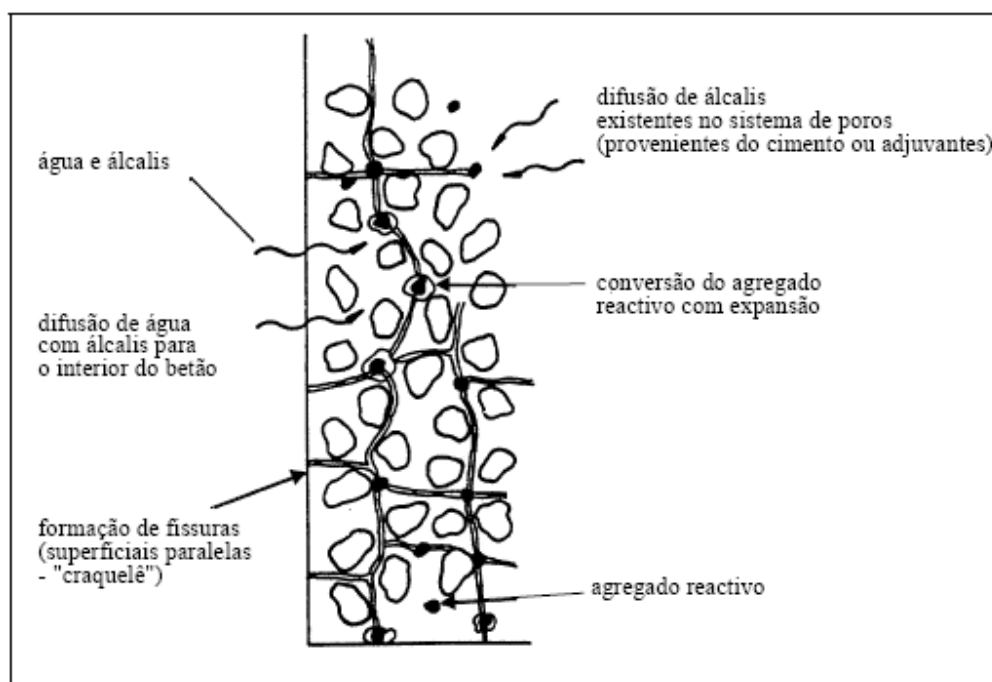


**Figura 6 - Reacção álcalis-sílica reactiva. Estados de alteração (1 a 4) de quartzo-filoneano em gel - fonte: (Coutinho, 1999)**

A composição do gel varia também á medida que se afasta do local inicial da reacção, tornando-se mais rica em cálcio e mais pobres em álcalis. Esta variação progressiva na composição do gel tem sido sugerida como sendo um mecanismo pelo qual os iões alcalinos

retornam à paste de cimento, permitindo assim que a reacção álcalis-sílica se continue a processar (Reis e outros, 1997).

Os geles compostos por reacção álcalis-sílica conseguem absorver água e aumentar de volume, tornando-se num gel duro e sólido a um gel mole, que, finalmente, se dispersa em solução. Quanto mais água é absorvida, a fenda por consequente, vai propagar-se para o interior do betão e ficando assim mais larga (Reis e outros, 1997).



**Figura 7 – Esquema do efeito da reacção álcalis-sílica reactiva - fonte: (CEB, 1992)**

Hoje em dia é geralmente aceite que o hidróxido de cálcio tem um papel importante no desenvolvimento das reacções álcalis-sílica e sua consequente expansão, como fonte de iões hidroxilos, permitindo a reacção dos sais alcalinos com a sílica reactiva, e intervindo no desenvolvimento das forças expansivas (Reis e outros, 1997).

É usual encontrar-se no betão afectado pelas reacções álcalis-sílica, para além dos geles, produtos de reacção cristalizados do tipo dos zeólitos, com morfologias idênticas quando observados ao microscópio electrónico de varrimento. Embora os efeitos expansivos estejam associados á formação dos geles, a detecção destes produtos cristalinos pode chamar à

atenção para a ocorrência das reacções álcalis-sílica no betão, contribuindo para o seu diagnóstico (Reis e outros, 1997).

### **3.4 Reacções álcalis-silicato**

Alguns especialistas associam este tipo de reacções essencialmente à reacção entre iões alcalinos da solução intersticial e certos minerais interestratificados com os filosilicatos, caso que é corrente ocorrer em rochas como grauvaques, filitos ou argilitos onde a remoção daqueles minerais provoca uma exfoliação do filosilicato que pode então expandir por absorção de água. Esta reacção álcalis-silicato é mais lenta que a reacção álcalis-sílica, podendo coexistir os dois tipos de reacção no betão, já que é normal nas rochas contendo filosilicatos existe quartzo microcristalino ou tectonizado. Como já havia referido, pelas relações intrínsecas entre as reacções álcalis-sílica e álcalis-silicato, são frequentemente englobados estes dois tipos de reacção num mesmo termo de reacções álcalis-sílica (RAS) (Reis e outros, 1997).

### **3.5 Reacção álcalis-carbonato**

A reacção álcalis-carbonato é explicada por uma desdolomitização, ou seja a decomposição do carbonato duplo em cálcio e magnésio por acção da solução intersticial alcalina, a qual origina um enfraquecimento da ligação pasta de cimento-inerte. Neste processo não há formação de geles expansivos, sendo a expansão, que em geral acompanha este fenómeno atribuída sobretudo à absorção de iões hidróxilo pelos minerais de argila que estão presentes, quer como material intergranular, quer como inclusões nos cristais de carbonato (Reis e outros, 1997).

Um aspecto típico destas reacções é a formação de zonas de reacção com até 2mm de largura em torno das partículas de agregado. A fendilhação desenvolve-se extensivamente no seio destes anéis tanto em paralelos à interface como numa direcção radial. As fendas radiais estendem-se lentamente, juntando-se a outras fendas na pasta. O desenvolvimento de uma rede de fendas, a perda de adesão entre agregado e a pasta, conduz, eventualmente, à deterioração do betão (Reis e outros, 1999).

A ocorrência deste tipo de reacção tem levantado alguns problemas em certos países, nomeadamente no Canadá, mas não se reveste de significado na Europa (Reis e outros, 1997).

### **3.6 As causas que condicionam o desenvolvimento da RAS**

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

Os factores que condicionam o desenvolvimento da RAS são as seguintes:

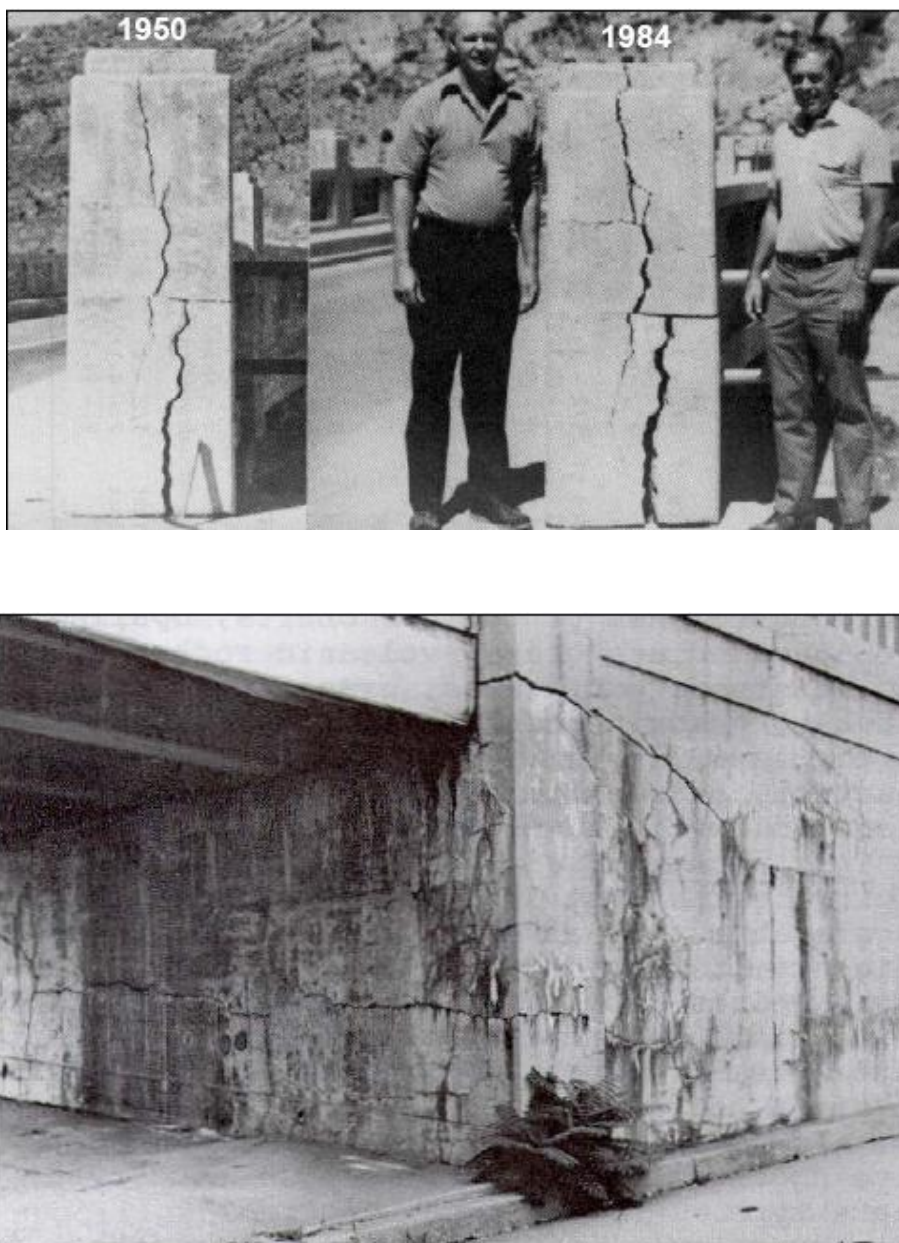
- Alcalinidade suficiente elevada intersticial.
- Existência de inertes reactivos com concentrações dentro duma gama crítica.
- Humidade elevada.

A RAS só será perigosa quando se verificarem todas estas condições. Se algum dos factores não existir então não haverá degradação do betão e não terão que ser tomadas precauções especiais para prevenir a RAS. Assim, duma maneira ou doutra todas as especificações que são propostas para evitar a deterioração por RAS procuram excluir pelo menos um dos três factores referidos (Reis e outros, 1997).

O vidro artificial também pode causar uma reacção alcalina (Coutinho, 1999). Os sinais aparentes da reacção são as seguintes:

- Alargamento excessivo e deformações desordenadas, causando fissuras em direcções que não condizem às tensões instituídas na estrutura.
- Desenvolvimento de crateras mais ou menos profundas, de forma cónica.
- Exsudação de um gel sílico-alcalino.

Na Figura 8 mostram-se os efeitos de deterioração do betão por reacção álcalis-sílica reactiva.



**Figura 8 – Deterioração do betão por reacções álcalis-sílica reactiva - fonte: (Coutinho, 1999)**

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

### **3.7 Métodos de prevenção e reparação**

Podemos afirmar que ainda não se conhecem métodos que possam ser recomendados em geral para evitar uma rápida deterioração duma estrutura afectada por reacção álcalis-sílica ou para se poder realizar reparações efectivas e duradouras, mas por outro lado podemos tentar

retardar o processo de degradação limitando o acesso da humidade. Tendo sido desenvolvidos nestes últimos anos algumas técnicas de reparação baseadas essencialmente no preenchimento das fissuras por injeção de resinas ou argamassas de cimento e revestindo a superfície do betão com materiais impermeáveis ou repelentes de água com base em resinas (epoxídicas, poliuretano, polibutadieno, silanos, etc.) ou cimentos com polímeros (Reis e outros, 1999).

No projecto duma nova estrutura de betão é importante que sejam adoptadas medidas a fim de prevenir e minimizar os efeitos dos diferentes factores condicionantes de reacções álcalis-sílica, onde naturalmente os riscos e as consequências económicas da eventual ocorrência de reacções álcalis-sílica forem consideradas aceitáveis, não haverá necessidade de tomar precauções específicas.

A reacção álcalis-sílica representa apenas um dos fenómenos que pode afectar a vida útil de uma estrutura aérea de betão armado e portanto, ao tomarem-se decisões sobre eventuais preocupações para prevenir o risco das reacções álcalis-sílica deve ter-se em consideração as propriedades e o desempenho previsto pelo betão, em particular no que se refere à durabilidade em geral, deverá atender-se à resistência do betão, à meteorização e a outras acções agressivas e à capacidade do betão de proteger as armaduras (Reis e outros, 1999).

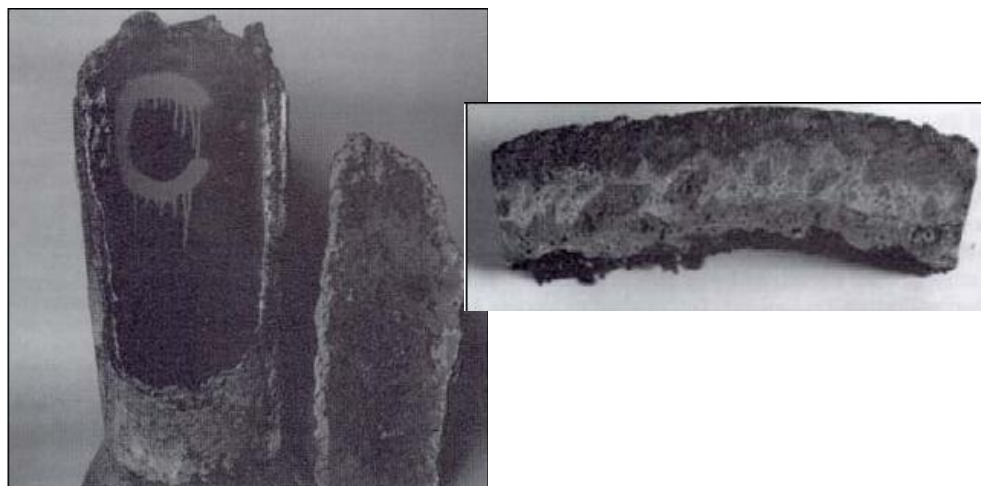
Quando o betão pode ser mantido com uma humidade interna inferior a 75%, não serão necessárias tomar outras preocupações com as reacções álcalis-sílica, ou seja, poderá ser o caso dum edifício em partes secas e bem ventiladas, mas não nas fundações e zonas sujeitas a condensações. É necessário ter em conta que uma das piores condições é mesmo as condições quentes e húmidas. Dado na maioria dos casos não ser possível proteger o betão da humidade, as recomendações gerais para prevenir a reacção álcalis-sílica que têm sido estabelecidas assentam essencialmente na limitação do teor admissível de álcalis no betão e na utilização de inertes reactivos.

Já para as estruturas que não estejam em contacto com fontes exteriores de sais alcalinos e estruturas onde não haja migração interna de álcalis que possa originar concentrações locais de álcalis, tem sido consideradas em geral suficientes recomendações no que diz respeito à limitação de álcalis, tais como em primeiro a utilização de um cimento com um teor de  $\text{Na}_2\text{O}$  equivalente de 0.6% ou inferior, por outro lado limitar o teor total de álcalis solúvel no betão a

3.0Kg/m<sup>3</sup> de Na<sub>2</sub>O equivalente. Podemos ainda ter as cinzas volantes, escórias granuladas de alto forno moídas, sílicas de fumo ou pozolanas artificiais ou naturais, são hoje em dia largamente utilizadas para combater o risco de expansão a nível perigoso no betão devido a reacções álcalis-inerte. Não há ainda um acordo geral em como tomar em conta a contribuição do teor de álcalis dessas adições para o teor de álcalis solúveis no betão ou com as incluir nas especificações para prevenir as reacções álcalis-sílica (Reis e outros, 1999).

## CAPÍTULO IV – ATAQUE DE SULFATOS

Este mecanismo consiste na deterioração do betão resultante da interacção química entre os compostos da pasta de cimento e os iões de sulfato vindos do exterior ou dos próprios agregados constituintes da pasta de cimento. Este mecanismo causa expansões, fissuração, descamação do betão, amolecimento e desintegração (Gonçalves e outros, 1999).

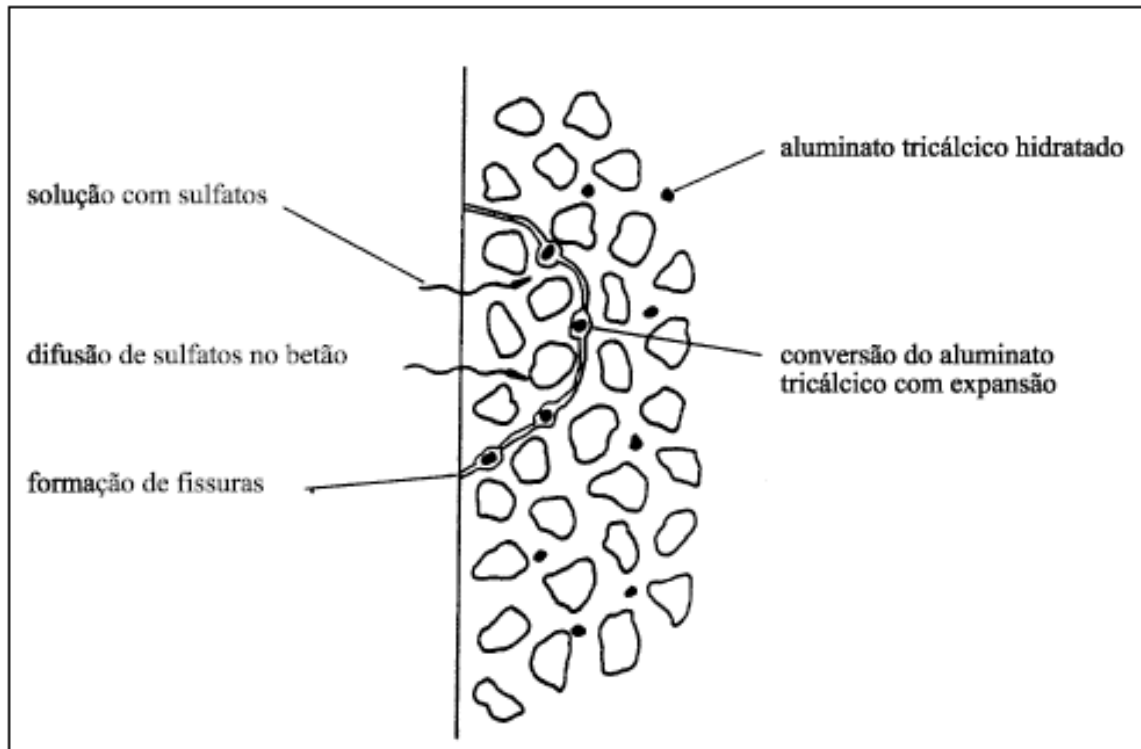


**Figura 9 - Degradação de uma manilha de betão por ataque de sulfatos - fonte: (Coutinho, 2001)**

As expansões podem provocar um aumento de volume do betão que pode chegar duas vezes e meia do seu volume inicial, o que vai causar tensões no interior do betão causando fendas o que facilita a entrada de outros agentes de deterioração (Gonçalves e outros, 1999).

Na degradação consequente do ataque por sulfatos, em ambiente quimicamente agressivo, para um determinado doseamento de cimento, deriva nitidamente do teor de  $C_3A$  (aluminato tricálcico) desse cimento, vai sendo menos evidente à medida que a dosagem aumenta, ou seja, verifica-se um comportamento inversamente proporcional (Gonçalves e outros, 1999).

Podemos encontrar frequentemente em quantidades avultadas os sulfatos de cálcio, magnésio, sódio e potássio onde estes estão presentes em solos argilosos ou outros solos. Podemos constatar que a distribuição em causa é considerada, uma distribuição heterogénea, ou seja, em áreas circundantes relativamente próximas encontramos disparidades em termos de concentrações (Coutinho, 2001).



**Figura 10 – Efeito de ataques por sulfatos - fonte: (CEB, 1992)**

Provindo do movimento de percolação, podemos afirmar que a concentração de sulfatos pode obter variações devido as soluções percolantes nos solos, onde podemos retirar uma das questões de maior importância, a solubilidade do sal de sulfato em incisão (Coutinho, 2001).

A presença de sulfato é a principal influência do mecanismo e grau de ataque dos mesmos, ou seja, a generalidade dos sulfatos levam a um caminho de degradação do cimento Portland (Coutinho, 2001).

Um dos acontecimentos mais usuais deste facto é o aparecimento e desenvolvimento da etringite, devido a isto, podemos afirmar que o resultado tem origem na reacção entre os iões sulfato, hidróxido de cálcio e alumina, bem como na desajustada temperatura de cura do cimento Portland, o qual se denomina por formação retardada de etringite (Gonçalves e outros, 1999).

Numa forma mais reduzida, sobretudo em ambientes molhados e frios, é a formação do composto taumasite, um sulfocarbonato de cálcio e sílica hidratada, atingindo a decomposição da fase silicato de cálcio hidratado na pasta de cimento (Gonçalves e outros, 1999).

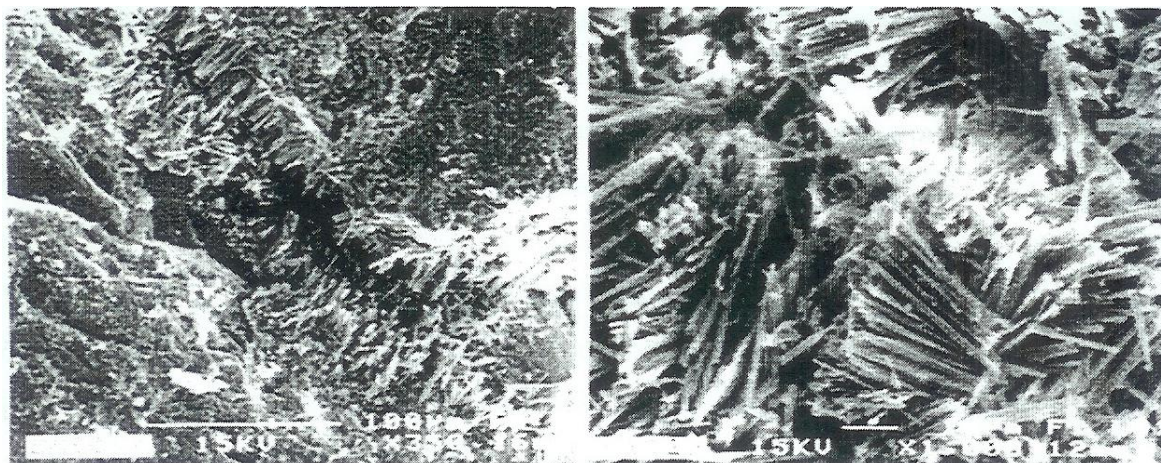
A formação do gesso no betão tem por principal causa o facto acima referido, mas por outro lado, quando o betão é submetido a um ataque morado por soluções de sulfato agressivas, estas compostas, por exemplo sulfatos de magnésio. Este ataque leva á redução da rigidez e resistência do betão (Gonçalves e outros, 1999).

#### 4.1. Mecanismos de ataque de sulfatos

- **Formação de Etringite**

Tal como foi referido a cima o ataque de sulfatos resulta normalmente na expansão e formação de fendas, associado à formação de etringite na pedra de betão, que é designada por etringite secundária, ao contrario da etringite formada na fase inicial de hidratação do cimento que é apelidada de etringite primária (Gonçalves e outros, 1999).

A etringite, quando observada ao microscópio electrónico, apresenta a forma de agulhas.



**Figura 11 – Imagem da etringite ao microscópio electrónico - fonte: (Gonçalves e outros, 1999)**

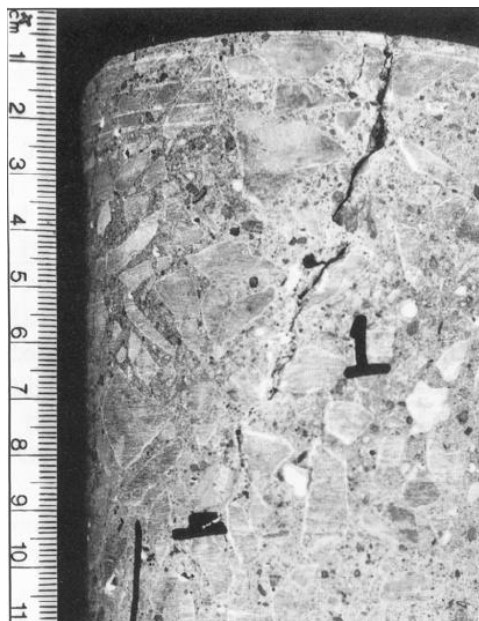
No caso de termos um ataque de sulfato de sódio, espera-se que a formação de etringite seja o efeito dominante, na presença de hidróxido de cálcio e alumina. Dando-se numa primeira fase a formação de gesso (Gonçalves e outros, 1999).

Quando a quantidade de sulfatos é elevada, superior a 1000 mg/l e a concentração de iões  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  na água de hidratação do cimento excede a de solubilidade do gesso, não se dá, geralmente expansão e a reacção dá-se apenas nos poros da pasta de cimento.

O gesso reage com os aluminatos do cimento produzindo a etringite. A reacção pode ocorrer com aluminato tricalcico  $\text{C}_3\text{A}$ , com tetracalcio aluminato hidratado  $\text{C}_4\text{A}\cdot\text{H}_{19}$  ou com monossulfoaluminato de cálcio hidratado  $\text{C}_3\text{A}\cdot\text{CS}\cdot\text{H}_{18}$  (Gonçalves e outros, 1999).

- **Formação retardada de etringite ou ataque interno por sulfatos (DEF – delayed ettringite formation)**

A formação retardada de etringite pode ser vista como uma forma de ataque interno dos sulfatos causada por inadequada temperatura de cura e/ou armazenamento do cimento Portland. Experiências demonstram que a formação retardada de etringite ocorre após 2 a 6 anos de exposição (Gonçalves e outros, 1999).



**Figura 12 - Microfissura provavelmente causada por formação retardada de etringite num provete de betão de 21 anos - fonte: <http://paginas.fe.up.pt/~jcouti/ATAKSulfato.pdf>**

Existem várias teorias diferentes propondo explicar o mecanismo de expansão da etringite, hoje em dia são aceites três teorias principais (Reis e outros, 1999):

- Difusão devido ao crescimento da etringite formado por um processo topoquímico na presença da cal, directamente a partir dos hidratados de alumina sem passar pela solução. Esta foi a primeira hipótese proposta por Lafuma em 1930 e seguido por muitos outros autores;
- Difusão devido à absorção de água pela etringite de natureza coloidal formada por um processo de cristalização/solubilização na presença de cal. Esta teoria foi sugerida por Mehta e colaboradores por volta de 1970 sendo bem aceite por muitos outros autores;
- Difusão devido à pressão de cristalização da etringite formado por um processo de cristalização/solubilização num espaço confinado. A força de expansão resulta da sobre saturação da solução com o ião reactivo, sendo tanto maior quanto maior for a saturação da solução.

A etringite primária torna-se instável a temperaturas superiores a 65-70 °C. Sob estas condições etringite primária não se formará, e a etringite que se formará após a cura irá decompor-se e libertar sulfatos. Estes sulfatos podem permanecer no betão, formar monossulfato, ou ser incorporado nos hidratos de silicato de cálcio.

Caso o betão esteja sujeito a condições de elevada humidade, a etringite formar-se-á lentamente causando expansão e formando fendas em volta dos agregados, e por consequência causar fendas no betão. A existência de fendas em volta dos agregados é um típico efeito da formação retardada de etringite (Gonçalves e outros, 1999).

Na maioria dos casos estudados a formação retardada de etringite aparece associada a reacções alcali-silica e muitas dúvidas existem sobre se a etringite retardada por si só pode levar à existência de fendas, ou se apenas aumenta fendas já existentes devido a outros processos de deterioração (Gonçalves e outros, 1999).

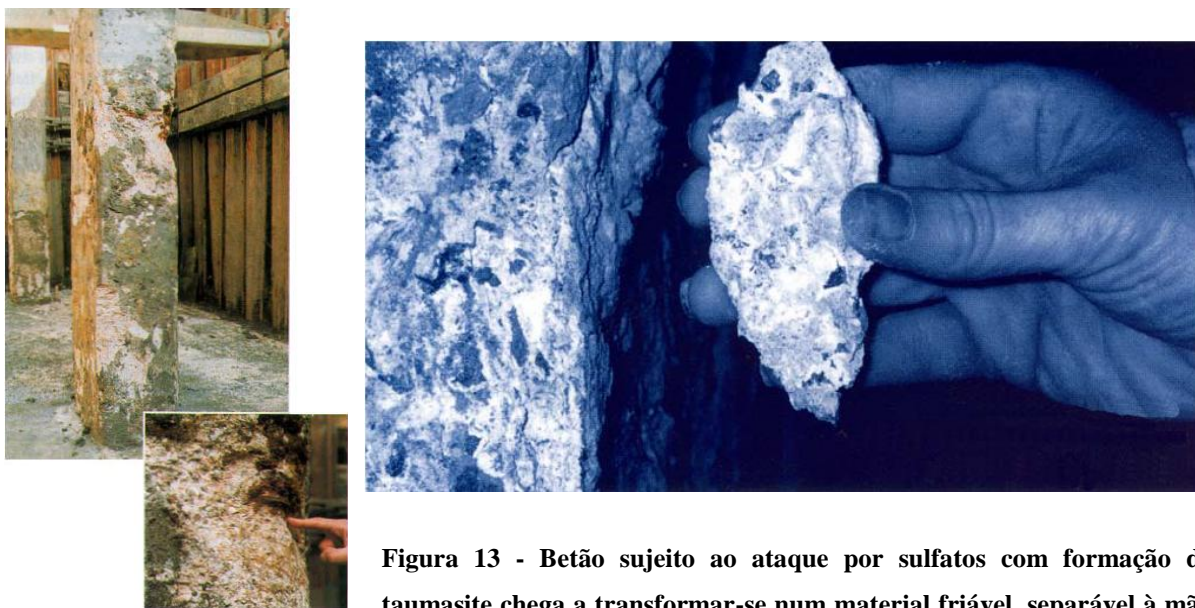
- **Formação de Taumasite (TSA – thaumasite form of sulfate attack)**

A taumasite é produzida quando as águas em contacto com o betão apresentam significantes quantidades de sulfatos e carbonatos e existe uma variação de temperatura entre 5 – 15 °C. Pode ser produzida por dois métodos distintos (Gonçalves e outros, 1999):

⇒ Reacção dos silicatos de cálcio hidratados do cimento com sulfatos e carbonatos;

⇒ Transformação da etringite por reacção com silícios na presença de iões carbonato.

Esta forma de ataque no betão é diferente da clássica onde se dá a formação de etringite, porque são os silicatos cálcicos hidratados, a fase C-S-H, na pasta de cimento já endurecida que são envolvidos na reacção química em vez do aluminato de cálcio. A formação de taumasite torna o betão menos rígido e menos resistente (Gonçalves e outros, 1999).



**Figura 13 - Betão sujeito ao ataque por sulfatos com formação de taumasite chega a transformar-se num material friável, separável à mão**  
- fonte: <http://paginas.fe.up.pt/~jcouti/ATAKSulfato.pdf>

Na observação ao microscópio electrónico, a taumasite apresenta uma estrutura muito similar à da etringite, sendo portanto muito fácil confundi-las. A estrutura cristalina é também muito similar, e também por difracção de raio-X é muito difícil diferencia a etringite da taumasite. Normalmente podemos diferenciá-las usando SEM/EDAX (Gonçalves e outros, 1999).

- **Destruição da fase C-S-H**

O ataque na fase C-S-H da pasta de cimento Portland por  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  é limitado devido á presença abundante de CH. No caso de um ataque por soluções de  $\text{MgSO}_4$  pode dar-se a formação de gesso, brucite e sílica hidratada (Gonçalves e outros, 1999).

As reacções que envolvem o ião  $\text{Mg}^{2+}$  diminuem o pH e conseqüentemente destroem a fase C-S-H nas regiões atacadas. Na presença de baixas quantidades de hidróxido de cálcio a estabilidade da fase C-S-H é fortemente afectada pela presença dos iões  $\text{Mg}^{2+}$  (Gonçalves e outros, 1999).

A experiência mostra-nos que no caso da pasta normal de cimento Portland ou na pasta de cimento Portland resistente a sulfatos atacadas por  $\text{MgSO}_4$ , pode dar-se a formação de uma camada de gesso e brucite na superfície com efeito protector (Gonçalves e outros, 1999).

#### **4.2. Papel dos agregados no ataque dos sulfatos**

- **Agregados como fonte de alumina**

Normalmente a etringite é formada como resultado de uma reacção entre sulfatos e aluminatos presentes no cimento. A formação de etringite pode dar-se mesmo em cimentos com baixo teor de  $\text{C}_3\text{A}$ , caso a alumina reactiva seja proveniente dos agregados, tal como no caso dos agregados que contenham feldspatos alterados (Gonçalves e outros, 1999).

Estudos levados a cabo pelo LNEC desde a década de 50, devido a problemas existentes em estruturas portuárias em Leixões e Viana do Castelo, levaram à conclusão de que a desagregação do cimento Portland ocorria quando os agregados eram provenientes de granitos que continham feldspatos caulinizados. Este facto é explicado pela formação de sulfoaluminato de cálcio expansivo, como resultado da acção dos iões sulfatos no feldspato caulinzado alcalino (Gonçalves e outros, 1999).

- **Agregados como fonte de Sulfatos**

Os agregados podem ser uma fonte interna de sulfatos, quer acidentalmente, como no caso de uma contaminação dos agregados com desperdícios de gesso, ou mais frequentemente devido à presença de inclusões de pirite. A pirite é instável em ambientes húmidos e propícios à oxidação, dando origem a ácido sulfúrico que é bastante reactivo com o cimento ou agregados constituintes, levando à formação de produtos com tendência a expandirem-se, tais como a etringite e o gesso (Gonçalves e outros, 1999).

### **4.3. Medidas de prevenção de ataques de sulfatos**

Os principais parâmetros que influenciam esta reacção expansiva, são (Coutinho, 1998):

- Condições de exposição, isto é, a severidade do ataque e portanto a quantidade de substância agressiva;
- Acessibilidade da substância agressiva e, portanto, a permeabilidade do betão que influencia a velocidade de transporte;
- Susceptibilidade do betão que depende do tipo de cimento usado, ou seja, da quantidade de substância reactiva que ele contém;
- Quantidade de água em presença.

Assumindo que não podemos impedir que a água contendo sulfatos entre em contacto com o betão, a única defesa contra o ataque de sulfatos consiste em controlar a qualidade do betão, especialmente a sua permeabilidade. Alta quantidade de cimento, baixo rácio água/cimento, uma compactação e cura apropriadas e um controlo das fendas estão entre os factores mais importantes que contribuem para uma baixa permeabilidade do betão. Se for impossível controlar o aparecimento de fendas no betão, podemos ainda utilizar cimentos com resistência a sulfatos e/ou usar misturas minerais no betão. As pozolanas, quando devidamente usadas, constituem uma boa alternativa ao uso de cimentos com resistência aos sulfatos.

## **CAPÍTULO V – ATAQUE DE ÁGUA, ÁCIDO E EXPOSIÇÃO AOS SAIS**

### **5.1 Água Pura**

Este tipo de ataque é usualmente muito lento, a não ser que a água possa trespassar continuamente a massa de betão.

O pH vai diminuir, devido á lixiviação do hidróxido de cálcio, tal como se pode verificar na tabela seguinte.

Naturalmente que este ataque se verifica essencialmente em betões não muito compactos, pois quanto mais compactos forem os betões maior será a dificuldade da água em penetrar. Os cimentos são tanto mais resistentes a este tipo de ataque quanto menos ricos forem em cálcio, caso dos cimentos com adições minerais e do cimento aluminoso.

O processo de degradação dá-se devido a uma erosão progressiva do betão provocada quer pela circulação da água superficial quer pela infiltração da água para o interior do betão.

### **5.2 Estragos provocados pela água do mar**

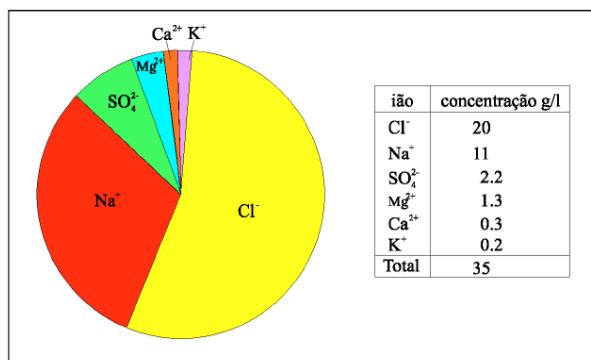
Devido à composição de elementos químicos agressivos da água do mar, o betão está comprometido a períodos frequentes de gelo/degelo e de secagem/molhagem, logo a degradação do betão é tanto de natureza física como química (Ferreira, 2000).

Existem três zonas diferentes em relação à cota da estrutura de betão comparativamente com o nível das ondas do mar, que influenciam directamente o grau do ataque marítimo. A primeira zona é a superior, acima da maré-alta, onde é constatado que não está em contacto com a água do mar, mas por outro lado, está patente ao ar atmosférico, acção das geadas e de sais transportados pelo vento. Em segundo temos a zona intermédia, entre marés, o que implica a ciclos alternativos de gelo/degelo, secagem/molhagem, choques com ondas e de gelo flutuante, erosão das areias e de corrosão das armaduras. A terceira zona, a inferior, por ser a zona que obriga a estrutura a estar numa menor cota, logo submersa em água, é

consideravelmente estável por não ocorrer a acção gelo/degelo e corrosão das armaduras. A perda de resistência é causada pelo ataque químico devido à acção de deterioração predominante (Ferreira, 2000).

A resistência do betão à água do mar está directamente relacionada com a qualidade do mesmo, ou seja, a densidade do betão, o tipo e dosagem de cimento. Betões fabricados com aluminatos de cálcio, cimentos super sulfatados, e qualquer que contêm materiais cimentícios adicionais portam-se melhor (Ferreira, 2000).

As concentrações dos vários iões na água do mar no Atlântico distante da foz dos rios são a que se apresenta na figura a seguir.



**Figura 14 – Concentração média de iões na água do Atlântico - fonte:**  
<http://paginas.fe.up.pt/~jcouti/Tese%2055a64.pdf>

Apesar de a água do mar ter uma série de sais em solução, tais como, os sulfatos potencialmente muito ofensivos, verifica-se que devido à existência de cloreto de sódio o ataque é apenas moderado (CEB, 1992).

### 5.3 Ataque ácido

O ataque ácido ocorre da reacção entre os compostos do cimento e a solução atacante, levando ao desenvolvimento de compostos que são lixiviados do betão, podendo também permanecer numa forma não aderente ao betão, originando na perda progressiva de resistência. Todos os compostos de cimento Portland são passíveis de degradação, tendo como alvo de um ataque acentuado o hidróxido de cálcio. As soluções ácidas orgânicas

(láctico, acético fórmico, tânico, propiónico entre outros) e minerais (sulfúrico, hidroclórico, nítrico e fosfórico) são sem dúvida as mais hostis para o betão. O ataque pode ser apenas ácido, ou então, seguido de um ataque de sal, isto pode ocorrer derivando do tipo de ácido (Ferreira, 2000).

O ácido não consegue trespassar o betão maciço sem ser destruído à medida que trespassa no seu interior, por o mesmo ter uma acentuada alcalinidade, sendo assim, não consegue deteriorar o betão sem que a camada de cimento na face esteja totalmente destruída (Ferreira, 2000).

Geralmente é depositado o produto de reacção, neste caso, o sal na face do betão pelo ácido atacante, por exemplo, ácido sulfúrico reage com o hidróxido de cálcio do cimento, produzindo sulfato de cálcio que é depois depositado como gesso. A reacção pode ainda continuar, originando na cristalização do produto de reacção, que vai causar forças expansivas no seu interior, por exemplo, quando o sulfato de cálcio reage com os aluminatos de cálcio hidratados do cimento, formando sulfoaluminato de cálcio, igualmente conhecido por etringite, na qual também pode provocar a rotura expansiva do betão (Ferreira, 2000).

A corrosão ácida que eventualmente poderá não ser seguida por expansão é causada pelos ácidos que possuem o ião sulfato, mediante, o ataque de um ácido orgânico no betão que cria uma massa sem coesão onde o cimento é decomposto e contém muito pouca resistência. Os ácidos orgânicos em convivência com o betão têm como resultado, um efeito prejudicial sobre ele. Estes ácidos podem ser divididos em dois grupos, como este descrito na tabela 2 (Ferreira, 2000).

O ácido láctico tem como principais características a destruição da pasta de cimento, este género de ataque aparece nos pavimentos de leitarias e fábricas de queijo. O ácido acético é nomeadamente implacável tanto para o cimento aluminoso como para o cimento Portland, aparecendo apenas os primeiros prejuízos evidentes após alguns meses de exposição (Ferreira, 2000).

A grandeza de ataque das águas ácidas aumenta como aumento da acidez e a diminuição do valor do pH, isto devido á existência de ácidos orgânicos ou inorgânicos e dióxido de carbono, tendo como causa ataques mais ofensivos (Ferreira, 2000).

**Tabela 2 – Ácidos que causam ataque químico no betão - fonte: (Neville, 1995)**

<b>Ácidos</b>	
Inorgânicos	Orgânicos
Carbónico	Acético
Hidroclórico	Cítrico
Hidrofluórico	Fórmico
Nítrico	Húmico
Fosfórico	lático
Sulfúrico	Tânico
<b>Outras Substâncias</b>	
Cloretos de Alumínio	Gorduras animais e vegetais
Sais de amoníaco	Óleos vegetais
Sulfuretos de hidrogénio	Sulfatos

#### **5.4 Ataque devido à exposição a sais**

Este efeito mostra-se de duas formas (Ferreira, 2000):

- Quando o betão é assentado em solos onde a água contém um alto teor em sal, contém uma exposição para evaporação, a água salina deslocar-se-á em direcção à superfície reunindo sais nesta área, por consequência o sal cristaliza-se nos poros, originando tensões expansivas, dando origem ao deslocamento do betão.
- Quando o betão está sujeito a circunstâncias marinhas, nomeadamente na zona das marés, onde estará comprometido a períodos mútuos de salpicagem com água salina e períodos de secagem, dando origem a altos níveis de sais nas faces quando esta evapora.

## CONCLUSÃO

Após a elaboração deste trabalho verificou-se, que no exterior das estruturas os factores climáticos, tais como a temperatura, a água, a impureza do ar e do vento são relevantes para a deterioração dos materiais. Porém, a utilidade destes varia largamente com o tipo de clima, situação geográfica e altura do ano. Os agentes de degradação podem interagir de maneira a ampliar a degradação, ou mas não tão frequente, reduzir a velocidade de degradação anulando o efeito de outros agentes.

Para que ocorra a deterioração do betão, deve haver um ou mais factores do meio ambiente agindo sobre o betão. Através do controlo ou a eliminação de apenas um destes factores poderá acabar com o processo.

Verificou-se também que podemos prevenir ou retardar alguns dos ataques mencionados no trabalho, como é o caso do aumento do recobrimento, usar betão de boa qualidade, baixo rácio água/cimento, uma compactação e cura apropriadas e um controlo das fendas. Caso não se consiga controlar a manifestação de fendas no betão podemos fazer o preenchimento através da injeção de resinas ou argamassas de cimento e revestindo a superfície do betão com materiais impermeáveis ou repelentes de água com base em resinas ou cimentos com polímeros.

Por fim, foi possível concluir que é indispensável conhecer bem as propriedades e características dos agentes e componentes, para conseguir através desse conhecimento, um correcto uso e assim evitar algumas anomalias nas estruturas.

## BIBLIOGRAFIA

- Salta, M.; Fontainha, R (1996). *Utilização de armaduras revestidas e de materiais resistentes à corrosão. Prevenção da Corrosão em Estruturas de Betão Armado*. Lisboa, LNEC.
- Richardson, M.G (1998). *Carbonation of reinforced concrete. It's causes and management*. Dublin, Citis Ltd, Publishers.
- Papadakis, V.G. Fardis, M.N.; (1992). *Effect of composition, environmental factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation. Material and Structures Vol. 25, N°.5*. Springer Netherlands.
- Martins, J.G.; Assunção, J.S (2004). *Argamassas e Rebocos. Materiais de Construção*. Sebenta U.F.P, 1.ª Edição.
- Emmons, P.H (1993). *Concrete repair and maintenance illustrated. Problems analysis, repair strategy and techniques*. R.S.Means Company.
- Neville, A.M (1995). *Properties of concrete*. England, Longman.
- E 253 (1971), *Inertes para argamassas e betões. Determinação do teor em halogenetos solúveis*. LNEC.
- Reis, M. Olinda e Silva, Henrique S. e Silva, A. Santos (1999). *Ocorrência de reacções álcalis-inerte em Portugal : estudos de casos*. Lisboa, LNEC.
- Reis, M. Olinda e Silva, A. Santos (1997). *Reacções álcalis-sílica : recomendações gerais para prevenir a deterioração do betão..* Lisboa, LNEC.
- Reis, M. Olinda e Silva, A. Santos (1999). *Recomendações gerais para prevenir a deterioração do betão por reacção alcalis sílica*. Lisboa, LNEC.
- Gonçalves, Arlindo; Reis, M. Olinda (1999). *“Sulphate attack of concrete”*. Lisboa, LNEC.
- CEB (1992). *Durable concrete structures*. CEB, Thomas Telford.
- Reis, M.Olinda; Salta, M.M.; Silva, A.S (1999). *Degradation of reinforced concrete structures in oceanic enviromet*. Lisboa, LNEC

## BIBLIOGRAFIA DIGITAL

- Coutinho, J (1999). Agregados para Argamassas e Betões. [Em linha]. Disponível em <http://paginas.fe.up.pt/~jcouti/agregpart1.pdf>. [Consultado em 15/02/2008];

- Disponível em <http://patologiaestrutura.vilabol.uol.com.br/relatos.htm>. [Consultado em 20/02/2008]
- Ferreira, R. Miguel (2000). Avaliação de Ensaios de Durabilidade do Betão. [Em linha]. Disponível em [https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/40/1/Rui\\_Miguel\\_Ferreira\\_DECivil.pdf](https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/40/1/Rui_Miguel_Ferreira_DECivil.pdf). [Consultado em 16/02/2008];
- Coutinho, J. (2001). Ataque por Sulfatos. [Em linha]. Disponível em <http://paginas.fe.up.pt/~jcouti/ATAKSulfato.pdf>. [Consultado em 15/02/2008];
- Coutinho, J. (1998). Durabilidade. [Em linha]. Disponível em <http://paginas.fe.up.pt/~jcouti/Tese%2055a64.pdf>. [Consultado em 15/02/2008].