



ISEL

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
Departamento de Engenharia Civil



## **Reabilitação de Estruturas Marítimas em Betão Armado**

**JOÃO JOSÉ CORDEIRO DOS SANTOS ALVES**  
LICENCIADO

Trabalho de Projecto para obtenção de grau de Mestre em Engenharia na Área de Especialização  
em Edificações

Orientadores:

Licenciado Especialista José Pedro Coelho Fernandes, Equiparado a Professor Adjunto (ISEL).

Júri:

Presidente:

Mestre Manuel Brazão de Castro Farinha, Professor Adjunto (ISEL).

Vogais :

Doutor em Engenharia Civil Thomaz José Ripper Barbosa Cordeiro (LEB).

Licenciado Especialista José Pedro Coelho Fernandes, Equiparado a Professor Adjunto (ISEL).

**Setembro de 2009**



## RESUMO

O betão armado é o principal material de construção de estruturas da nossa época que começaram a ser construídas de forma generalizada em Portugal a partir dos anos 60 do passado século. Quando surgiu, os projectistas e construtores julgavam tratar-se de um material eterno, insensível à acção do tempo. Por esta razão, não eram tomadas as medidas para salvaguardar a sua durabilidade, o que fez com que as patologias de deterioração de estruturas deste material sejam tão antigos quanto as próprias estruturas.

Reabilitar é reconduzir um elemento às condições de operacionalidade originais no entanto, quando se fala de estruturas, e em particular de estruturas marítimas em betão armado, recuperar deve ser também corrigir, eliminando erros e vícios que por via de regra ocorrem durante o projecto e a construção destas mesmas estruturas.

Esses aspectos conferem à recuperação estrutural um carácter especial na engenharia civil, dado que a sua execução é minuciosa onde a habilidade manual, a perícia e o conhecimento das técnicas de execução são fundamentais.

Com o evoluir da regulamentação do betão armado, a questão da durabilidade tem vindo a ser tratada de uma forma cada vez mais séria e o Eurocódigo 2, que irá substituir o actual Regulamento de Betão Armado, trata a durabilidade de uma forma muito mais abrangente e eficaz. Recentemente foi elaborada a norma NP EN 1504 - "Produtos e Sistemas para a Protecção e Reparação de Estruturas de Betão", que apresenta procedimentos e exigências para este tipo de intervenções, que são cada vez mais correntes.

A execução de um projecto de reabilitação de uma estrutura em betão armado numa ponte cais surge da vontade do autor aprofundar os seus conhecimentos nesta área, compilando e sistematizando de forma acessível informações que hoje se encontram dispersas.

Numa primeira parte, o projecto será estruturado de acordo com a norma NP EN 1504, apresentando um desenvolvimento daquilo que são as técnicas de protecção e reparação de estruturas de betão armado e dos materiais disponíveis para tal.

Numa segunda parte é apresentado um projecto de uma obra de reabilitação e protecção com a qual se pretende dar a conhecer quais as soluções correntes de intervenção.

**PALAVRAS-CHAVE:** Betão armado, deterioração, durabilidade, reabilitação, NP EN 1504.



## ABSTRACT

Reinforced concrete is the major structure building material of current times. Its widespread use started in the 1960's, when engineers and builders thought that it would be immune to the effect of passing times. For this reason, no measures were taken to increase its durability or protect it from damage by the surrounding environment. This belief has made it usual for such structures to have pathologies as old as themselves.

Rehabilitation has the purpose of restoring an element to its original operability conditions. Nonetheless, when rehabilitation takes place, especially on concrete structures in marine environment, it should provide a way to eliminate the problem and its cause, whom may have occurred during the structure's projecting or building.

Such considerations give structural rehabilitation a special relevance in building engineering, requiring that expert workers to perform it, with abiding execution rules being a fundamental practice.

With the evolution of the guidelines regarding reinforced concrete, the durability issue has been taken even more seriously nowadays. An example of such concern is the substitution of the actual rules, "Regulamento de Betão Armado", by the Eurocode 2. The newly-made EN1504 norm presents us with procedures and demands for such – now common – interventions.

The execution of a Project in the area of reinforced concrete rehabilitation on the concrete harbor structure comes from the author's urge to increase its own knowledge about the theme; compiling and organizing information that was disperse in the literature.

On its first half, this project is structured in a way similar to NP EN 1504, presenting the techniques for structure repair and protection of reinforced concrete and the available materials for such operation.

On the second half, a rehabilitation and protection project is presented, as a way of showing the current solutions for the mentioned issues.

**KEYWORDS:** Reinforced concrete, deterioration, durability, protection, repair, NP EN 1504



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

Departamento de Engenharia Civil



## **PEÇAS ESCRITAS**



## ÍNDICE PEÇAS ESCRITAS

MEMÓRIA DESCRITIVA E JUSTIFICATIVA .....	1
1. INTRODUÇÃO .....	2
2. - CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA.....	3
2.1- Aspectos funcionais e operacionais .....	3
2.2 - Tipo Estrutural.....	3
2.3 - Fundações da Estrutura .....	4
2.4 - Processo construtivo .....	4
2.5 - Ano de construção e vida útil.....	5
3- PRINCIPAIS MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO EM ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO EXPOSTAS A AMBIENTES MARÍTIMOS.....	8
3.1 - Observação Macroscópica .....	8
3.2 - Causas Físicas .....	10
3.3 - Causas Químicas.....	10
3.4 - Corrosão de Armaduras .....	12
3.5 - Cloretos .....	14
3.6 - Carbonatação .....	17
3.7 - Ataque químico do betão.....	18
4 - LEGISLAÇÃO .....	19
4.1 - NP EN 206-1 .....	19
4.2 - Norma NP EN1504 .....	20
5- ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS.....	22
5.1 - Resistência à Carbonatação .....	22
5.1.1 - Medição da carbonatação.....	22
5.1.2 - Ensaio para a avaliação da resistência à carbonatação.....	23
5.2 - Ensaio para avaliação da resistência à penetração dos cloretos .....	23
5.3 – Ensaio à estrutura da Ponte Cais n.º 5.....	24
5.3.1 - Teor em cloretos .....	25
5.3.2 - Teor em cimento.....	27
5.3.3 - Penetração da carbonatação .....	27
6- CARACTERIZAÇÃO DAS PATOLOGIAS .....	28



6. 1 - Deterioração de Estruturas de Betão Armado .....	28
6.1.1 - Deterioração por Razões Mecânicas.....	28
6.1.1.1 - Devido a Impacto .....	28
6.1.1.2 - Devido a Carregamento Excessivo .....	28
6.1.1.3 - Devido a Deslocamentos.....	29
6.1.1.4 - Devido a Explosões.....	29
6.1.1.5 - Devido a Vibrações.....	30
6.1.2 - Deterioração por Ataque Químico .....	30
6.1.2.1 - Devido a Reacções Álcalis Agregado .....	30
6.1.2.2 - Devido a Agentes Agressivos .....	31
6.1.3 - Deterioração Devido a Actividade Biológica .....	31
6.1.4 - Deterioração Por Acção Física.....	32
6.1.4.1 - Devido a Ciclos Gelo/Degelo .....	32
6.1.4.2 - Devido a Acção Térmica .....	32
6.1.4.3 - Devido à Retracção .....	33
6.1.4.4 - Devido a Erosão.....	33
6.1.4.5 - Devido a Utilização.....	34
6.2 - Deterioração Por Corrosão da Armadura .....	34
6.2.1 - Devido a Carbonatação .....	35
6.2.2 - Devido a Correntes Vagabundas .....	35
6.2.3 - Devido a Contaminantes Agressivos .....	36
6.2.3.1 - Cloretos Presentes na Mistura.....	36
6.2.3.2 - Cloretos com Origem no Ambiente Exterior .....	36
6.2.3.3 - Outros Contaminantes.....	37
6.2.3.4 - Defeitos não Mencionadas na NP EN1504-9 .....	37
6.3 - Relação Existente Entre Sintomas e Causas de Deterioração .....	38
7 - DIAGNÓSTICO DAS ESTRUTURAS DA PONTE CAIS .....	40
7.1 - Situação da ponte cais.....	40
7.1.1 – Fundações.....	44
7.1.2 – Superestrutura .....	45
8 - DETERMINAÇÃO DAS CAUSAS.....	47
9 - METODOLOGIAS PARA A REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO .....	50
9.1 - Protecção e Reparação de Estruturas de Betão de Acordo com a Norma NP EN1504. ..	50
9.1. 1 - Escolha do Método de Intervenção .....	50
9.1.2 - Considerações de Ordem Ambiental .....	52
9.1.3 - Princípios e Métodos de Protecção e Reparação .....	53
9.2 - Preparação dos Trabalhos.....	56
9.2.1 - Requisitos a Verificar Antes das Intervenções .....	56
9.2.2 - Preparação do Betão Existente .....	57
9.2.2.1 - Limpeza do Betão.....	57
9.2.2.2 - Aderência entre Materiais .....	58



9.2.2.3 - Remoção do Betão Danificado.....	58
9.2.3. - Preparação do Aço .....	59
9.3 - Controlo de Qualidade dos Trabalhos.....	60
9.3.1 - Colocação de Argamassa ou Micro betão em Zonas de Superfície Deteriorada .....	61
9.4 - Produtos disponíveis no mercado.....	65
10 - REABILITAÇÃO DA PONTE CAIS .....	67
10.1 - Infra-estrutura.....	67
10.2 - Super-estrutura.....	72
10.3 - Nota final.....	74
11- CONCLUSÕES.....	80
12- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	81
13 - BIBLIOGRAFIA CONSULTADA MAS NÃO REFERENCIADA NO TEXTO.....	82
ANEXOS.....	83
I - Mapa Resumo Observação Estacas.....	84
II - Mapa Resumo Observação Laje .....	86
III - Quadro Resultado dos Ensaios Estacas .....	88
IV - Quadro Resultado dos Ensaios Laje .....	90
V - Quantidades Estimadas de reparação Estacas.....	92
VI - Quantidades Estimadas de reparação laje.....	94
VII - Mapa de medições.....	96
VIII - Estimativa de custo da Obra .....	97
VIII - Especificações Técnicas.....	98



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

Departamento de Engenharia Civil



## **MEMÓRIA DESCRITIVA E JUSTIFICATIVA**



## 1. INTRODUÇÃO

O objectivo deste Projecto para obtenção do grau de Mestre é o de relacionar toda a informação disponível, em termos do aprofundamento e sistematização de conhecimento na área da protecção e reabilitação de estruturas de betão armado em ambiente marítimo, nomeadamente analisando as principais causas de deterioração destas estruturas, implementando o estudo e aplicação da norma NP EN 1504 - “Produtos e Sistemas para a Protecção e Reparação de Estruturas de Betão” recentemente elaborada sobre este tema.

Quando o betão armado surgiu, os projectistas e construtores julgavam tratar-se de um material eterno, insensível à acção do tempo. Por esta razão, não eram tomadas as medidas necessárias para salvaguardar a sua durabilidade, o que fez com que os problemas de deterioração de estruturas deste material sejam tão antigos quanto as próprias estruturas.

Com o evoluir da regulamentação do betão armado, esta questão tem vindo a ser tratada de uma forma cada vez mais séria e o Euro código 2, que irá substituir o actual Regulamento de Betão Armado, trata a durabilidade de uma forma muito abrangente e eficaz. A filosofia actual faz depender a durabilidade da qualidade do betão aplicado e dos valores de recobrimento das armaduras. No entanto, sabe-se agora que estruturas convenientemente projectadas necessitam de manutenção, de sistemas de protecção e, ainda assim, apresentam um período de vida útil limitado, de apenas 50 anos, para estruturas correntes.

A apresentação do projecto para reabilitação das estruturas da ponte cais n.º 5 na “Atlanport – Barreiro” permitirá ainda uma descrição das técnicas actualmente em uso para protecção e reparação de estruturas de betão armado em ambientes marítimos, bem como a identificação de materiais disponíveis no mercado adequados às técnicas referidas.



## 2. - CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA

### 2.1- Aspectos funcionais e operacionais

A Atlanport - Sociedade de Exploração Portuária SA é uma empresa operadora portuária, licenciada no Porto de Lisboa, com origem na actividade portuária que se iniciou no Barreiro em 1907, sendo detentora da concessão do Terminal Portuário do Barreiro, única instalação, na margem sul do rio Tejo, em que se efectuam operações de estiva e desestiva de granéis sólidos e líquidos e de carga geral.

As instalações da Atlanport - Sociedade de Exploração Portuária SA situam-se no também designado Terminal de Granéis Sólidos do Parque Industrial do Barreiro, na qual são recebidos os navios com os produtos movimentados no Terminal.

Com três pontes que perfazem cerca de 500 metros de cais acostável, permite a operação de navios com um comprimento até 150 metros, e um calado máximo de 8,5 metros.

A ponte cais n.º 5 foi construída no ano de 1958, pela então “Sociedade de Empreitadas e Trabalhos Hidráulicos, Lda.” tendo portanto já cerca de 50 anos de construção, o que a coloca num patamar de vida útil semelhante ao mesmo tempo atribuído às estruturas em betão armado projectadas nos dias de hoje.

### 2.2 - Tipo Estrutural

A estrutura da ponte cais n.º 5 da “Atlanport – Sociedade de Exploração Portuária, S.A.” no Parque Industrial do Barreiro, é constituída por um tabuleiro com 150 m. de comprimento e 19 m. de largura protegido na sua parte posterior por um prisma de entroncamento. Esta superestrutura é constituída por uma laje em betão armado com 0,40 m. de espessura assente sobre cinco vigas longitudinais, com o banzo voltado para cima. A altura do tabuleiro da ponte é de 1,20 m. onde só as vigas de bordadura têm esta altura. A viga frontal que constitui o bordo do cais é mais espessa do que as restantes, que apresentam espessura variável, para poder suportar as acções nos navios nas defensas de ancoragem e nos cabeços de amarração.

Esta concepção de tabuleiro de “laje de viga invertida” foi executada para oferecer menor superfície de exposição à agressão química das águas e ainda durante a sua execução se efectuassem melhores betonagens que contribuíssem para uma melhor qualidade do betão.



Esta mesma concepção permitiu, também, fazer-se a colocação das vias-férreas sobre travessas assentes em balastro, circulando o trânsito sobre o empedrado e, assim, evitar o desgaste da laje do tabuleiro.

O betão utilizado quer nas estacas quer no tabuleiro foi executado com uma dosagem de cimento não inferior a  $300 \text{ kg/m}^3$ .

O tabuleiro da ponte está compartimentado em quatro destes módulos designados por “I” a “IV”.

### 2.3 - Fundações da Estrutura

As fundações são executadas em estacas de betão armado “pré-fabricadas in situ” cravadas no leito do estuário e estão dispostas segundo alinhamentos longitudinais designados pelas letras “A” a “J” (de salientar que de uma maneira geral estão dispostas com inclinações tais que formam “cavaletes” para resistirem às acções horizontais nas direcções longitudinais e transversais no tabuleiro). As estacas foram pré-fabricadas em estaleiro e nos alinhamentos “A” a “H” têm 400 mm. de diâmetro e nos alinhamentos “I” e “J” têm 320 mm. de diâmetro.

O betão utilizado nas estacas foi executado com uma dosagem de cimento não inferior a  $300 \text{ kg/m}^3$ , com eventual adição de diatomite para obter uma melhor impermeabilização do betão.

### 2.4 - Processo construtivo

É da maior importância a análise do projecto e a sua comparação com a obra executada quer em termos de dimensões dos elementos estruturais quer na sua disposição. Isto porque não é raro a estrutura executada ser diferente do projecto existente, quer devido a alterações introduzidas durante a construção e não reproduzida no projecto, quer devido a alterações posteriores, quer ficaram por documentar.

É também importante a determinação sumária dos esforços a absorver pelos diferentes elementos estruturais e a sua comparação com a capacidade resistente desses elementos tirando partido das normas e regulamentos aplicáveis, (de salientar que para aumentos moderados das solicitações, uma análise cuidada das sobrecargas e suas possíveis reduções, do peso dos materiais aplicados, revestimentos, etc., poderá levar á conclusão da não necessidade de qualquer reforço ou unicamente a de reforços pontuais.



Da análise ao projecto da ponte cais n.º 5 efectuado por uma empresa da especialidade foram tiradas algumas conclusões que apontavam para que o projecto de execução estava bem elaborado. No seu método de cálculo são feitas simplificações que abonam em favor da segurança. O projecto foi elaborado em 1956 e perante os métodos de cálculo usados nos dias de hoje, permitem fazer estudos mais realistas (análise espacial de estruturas), permitindo a concepção de estruturas mais económicas.

Considerando como secção resistente das estacas a que corresponde ao menor dos valores medidos para o diâmetro, o conjunto estrutural estacas–tabuleiro continua a ter um funcionamento estrutural que se considera normal.

As deformações sofridas pela estrutura para cada uma das secções, poderão considerar-se admissíveis.

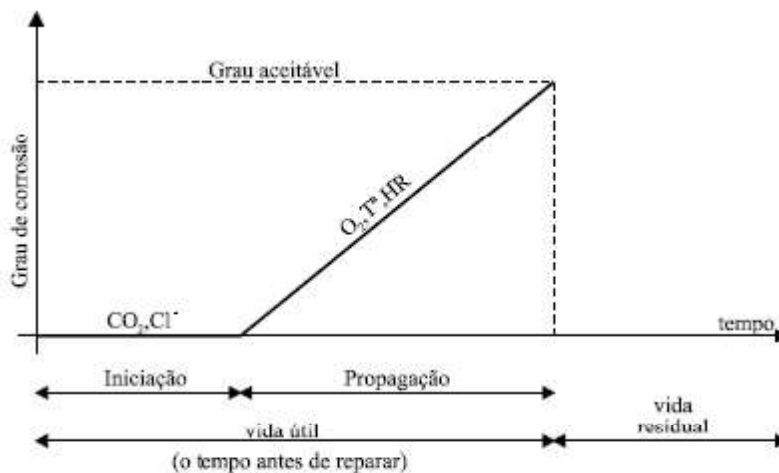
Em determinado momento, houve provavelmente uma revisão ao projecto, prevendo-se como hipótese pessimista no seu cálculo, o assentamento de um apoio intermédio (duplicando o vão), o que se traduziu num reforço da superestrutura com o conseqüente encarecimento daquela, o que veio permitir posteriormente salvaguardar o tabuleiro em zonas onde as estacas deixaram de trabalhar. A utilização de estacas inclinadas tinha como objectivo a absorção de esforços horizontais, método muito frequente na altura da construção, mas posto de parte nos dias hoje.

## **2.5 - Ano de construção e vida útil**

A durabilidade de uma estrutura de betão armado (ou pré-esforçado) depende quer da deterioração física, química e/ou biológica do betão de recobrimento, quer da corrosão das armaduras, podendo qualquer desses factores comprometer a estrutura em termos de resistência e rigidez, influenciando assim o desempenho da mesma. Dada essa susceptibilidade de degradação das estruturas de betão armado ao longo do tempo, em função das condições de exposição ambiental e da qualidade dos materiais que a compõem, têm-se vindo a desenvolver modelos matemáticos para modelar a degradação das estruturas associando-a ao seu tempo de vida útil. Como referido, uma das principais causas da degradação é a corrosão das armaduras devido à acção da carbonatação e à penetração dos cloretos. Dos vários modelos propostos para esta avaliação, o modelo de Tuutti, apresentado em 1982 parece ser o mais adequado. Este modelo estabelece uma relação entre o nível de degradação devido à corrosão das armaduras e o tempo. Definem-se dois períodos distintos da evolução da corrosão das



armaduras e o tempo. Definem-se dois períodos distintos da evolução da degradação: o período de iniciação e o período de propagação.



### desempenho

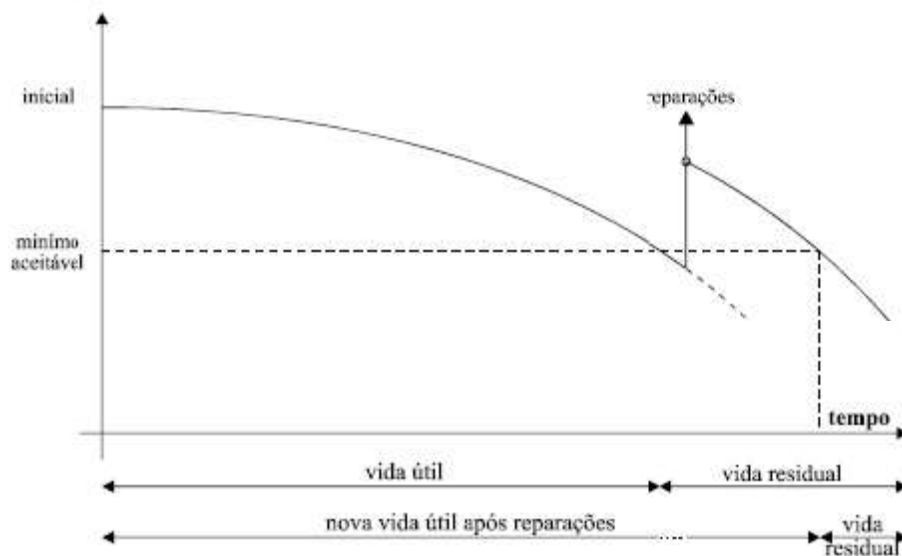


Figura1 - Vida útil e vida residual de uma estrutura [1]

- O **período de iniciação** corresponde ao tempo necessário para que o dióxido de carbono ou os cloretos penetrem no betão de recobrimento através da estrutura porosa do betão até às armaduras e criem condições para a despassivação das mesmas.



- O **período de propagação** corresponde ao período em que se inicia o processo corrosivo das armaduras e a degradação do betão armado. Ocorre entre a despassivação do aço e um determinado estado limite de durabilidade para o qual degradação da estrutura atinge níveis inaceitáveis. Estes níveis são estabelecidos e podem ser relativos à fendilhação ou delaminação do betão de recobrimento ou ainda a um estado último de rotura em que a segurança última da estrutura é colocada em causa devido à diminuição da secção transversal das armaduras.

- A **vida útil** Corresponde ao período de tempo durante o qual a estrutura satisfaz os requisitos de segurança, de funcionalidade e estéticos, sem custos de manutenção imprevistos. Está por isso associado ao período de tempo durante o qual o desempenho da estrutura é satisfatório, ou seja, superior a um mínimo aceitável.

- A **vida residual** de uma estrutura de betão armado ou pré-esforçado está associada ao período de tempo, a partir do instante em que se atinge o mínimo aceitável para o desempenho da mesma. Nesse instante será necessária uma intervenção de reparação com vista à recuperação das condições de segurança e funcionalidade definidas no projecto ou superiores [2]. O período de iniciação e de propagação terão diferentes pesos para o período de vida útil das estruturas. Em função dos micro-ambientes envolventes ter-se-ão tanto tempos de iniciação muito longos e de propagação muito curtos e vice-versa. Os casos em que a vida útil depende maioritariamente do período de iniciação: - Em ambientes ciclicamente húmidos e secos, em que o dióxido de carbono penetra lentamente através dos poros do betão, estão reunidas condições de humidade relativa suficientes que conferem propriedades electrolíticas ao betão. Conjuntamente com boa acessibilidade de oxigénio à estrutura porosa do betão, a corrosão desencadear-se-á rapidamente originando períodos de propagação muito curtos; - No caso da penetração dos cloretos ser lenta, em zonas de marés, de rebentação e de salpicos, e se existir boa acessibilidade de oxigénio, juntamente com condições de humidade relativa suficientes, quando o teor crítico de cloretos atingir a profundidade das armaduras, ocorrerá o processo corrosivo rapidamente; Situações em que o período de propagação é muito superior ao período de iniciação: - Em ambientes muito secos, onde a penetração do dióxido de carbono ocorre facilmente. Por sua vez, não existe humidade suficiente para que o betão funcione como electrólito, assim, dificilmente ocorrerá o processo corrosivo das armaduras; - Em estruturas de betão permanentemente submerso, onde ocorre penetração dos cloretos nos poros do betão, mas por outro lado, a acessibilidade do oxigénio à estrutura porosa do betão é praticamente nula devido à sua saturação, resultando velocidades de corrosão muito baixas.



### 3- PRINCIPAIS MECANISMOS DE DETERIORAÇÃO EM ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO EXPOSTAS A AMBIENTES MARÍTIMOS

#### 3.1 - Observação Macroscópica

O presente projecto de reabilitação abordará apenas os principais mecanismos de degradação dos elementos de betão armado expostos a ambientes marítimos, sendo contudo importante referir que, para além das causas de degradação que se apresentam de seguida, existe um vasto leque de fenómenos cuja importância será inferior, na maioria dos casos, mas que contribuem para o agravamento do fenómeno da deterioração (tais como a retracção e fluência do betão ou ainda a acção dos ciclos gelo/degelo que, não sendo esta última uma causa frequente de degradação habitual em Portugal),

A deterioração das estruturas de betão inseridas num ambiente marítimo pode ocorrer devido a fenómenos da natureza química e física tais como a acção das ondas e dos materiais transportados que provocam a erosão e desgaste da superfície de betão ou a exposição do betão às acções químicas dos constituintes agressivos da água do mar e a repetitivos de molhem/secagem ou gelo/degelo.

Este ambiente poderá estender-se até grandes distâncias da linha costeira devido à acção dos ventos fortes que, ao transportarem os agentes agressivos da água do mar, podem causar problemas de durabilidade nestas estruturas.

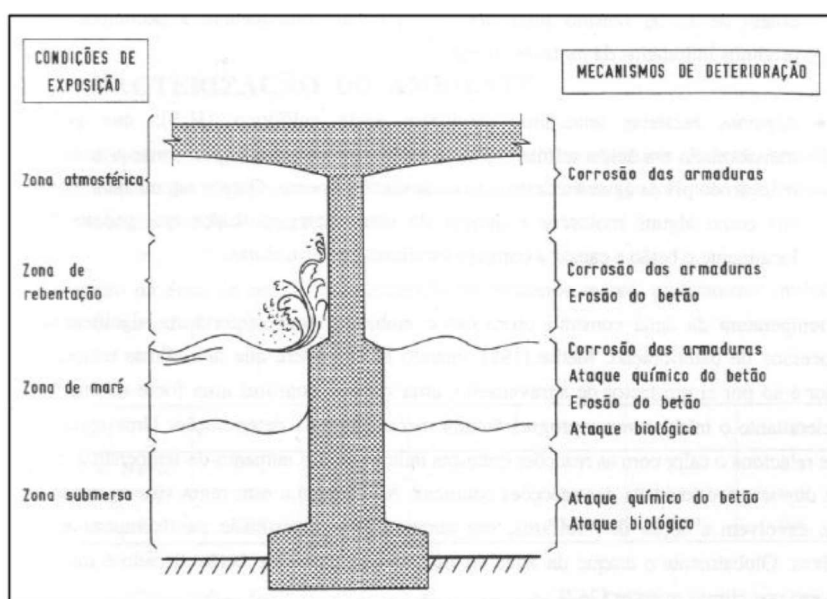


Fig. 2 – Condições de exposição e mecanismos de deterioração num ambiente marítimo [4].



No ambiente marítimo podem-se diferenciar quatro zonas micro climáticas (fig.2), em função do posicionamento do elemento de betão em relação ao nível do mar "zona atmosférica", "zona de rebentação", "zona de maré" e "zona submersa".

Começando a descrição pela base do pilar (Fig. 2), o primeiro microclima existente é denominado por "zona submersa". Esta caracteriza-se pelo facto de o betão estar permanentemente saturado, levando a um grande decréscimo da sua resistividade (em relação à resistividade de betão seco) e, conseqüentemente, a um aumento da penetração de cloretos. Contudo, como a difusão do oxigénio na água se dá com velocidades muito reduzidas, a corrosão neste microclima não tem grande significado, sendo o ataque químico e biológico do betão o principal mecanismo de deterioração nesta zona. Existe, todavia, a possibilidade de ocorrência de "corrosão negra" mesmo sem a presença de oxigénio em grandes quantidades, fenómeno este que é bastante gravoso para as estruturas já que, por não originar produtos de corrosão expansivos, não é facilmente detectável e origina grandes perdas de secção das armaduras.

Subindo ao longo do pilar, distingue-se um novo microclima: a "zona de marés". Neste caso, o betão não se encontra permanentemente submerso (maré cheia ocorre duas vezes por dia), fazendo com que a camada superficial do betão possa secar e a penetração do oxigénio se dê com maior facilidade. Este aspecto não ocorre no interior do betão, que continua a estar saturado devido à regularidade com que estas zonas se encontram submersas. Deste modo, os principais mecanismos de deterioração são o ataque químico e biológico do betão, a "corrosão negra" e a erosão do betão.

Acima da zona de marés, é possível identificar-se outro microclima, também caracterizado pelos ciclos de molhagem/secagem, mas onde os períodos de secagem são bastante mais prolongados do que no caso anterior, facilitando o acesso do oxigénio ao interior do betão e gerando assim condições para que a corrosão das armaduras se possa desenvolver com grandes velocidades. Este microclima é denominado por "zona de rebentação" e os principais mecanismos de deterioração são a corrosão de armaduras e a erosão do betão provocada pelo impacto das ondas do mar e dos materiais sólidos por este transportados.

Por fim, a uma maior distância do nível de água do mar, existe uma zona também exposta à acção dos sais devido ao transporte, por acção do vento, dos borrifos criados pela rebentação das ondas. Esta é denominada por "zona atmosférica" e pode afectar estruturas afastadas da costa, expondo-as aos agentes agressivos da água do mar. Neste microclima, a corrosão das armaduras por acção dos cloretos constitui o principal mecanismo de deterioração, embora a carbonatação do betão também possa ocorrer.



Este último mecanismo, embora constitua uma acção com uma agressividade muito inferior à dos cloretos, contribui significativamente para agravar a corrosão das armaduras provocada por este agente agressivo.

### 3.2 - Causas Físicas

Como foi exposto anteriormente, as principais causas físicas de degradação de estruturas de betão armado inserido num ambiente marítimo são:

- erosão e cavitação;
- impactos das ondas do mar.

A erosão é um tipo de desgaste importante para estruturas de betão em contacto com a água em escoamento uma vez que esta transporta muitas vezes areias ou calhaus que, ao entrar em contacto com o betão, o deterioram. Esta acção depende grandemente da velocidade do escoamento sendo mais importante, por exemplo, em descarregadores de cheias ou canais artificiais do que em estruturas edificadas em zonas marítimas. A erosão progride rapidamente assim que a camada superficial de betão é desgastada, podendo provocar estragos com profundidades de alguns centímetros até alguns metros [3].

A cavitação é a perda de material provocada pela implosão de bolhas de vapor no escoamento de um fluido a elevada velocidade. Este fenómeno é provocado por uma alteração repentina da velocidade ou direcção do escoamento ou ainda quando se dá uma diminuição de pressão na água, originando a formação de cavidades que, ao passar em zonas de elevada pressão, entram em colapso e provocam um grande impacto no betão [3].

### 3.3 - Causas Químicas

O cimento portland hidratado é atacado por muitos sais e soluções ácidas do meio ambiente que podem induzir várias formas de deterioração química do betão através de reacções com a pasta de cimento ou com os constituintes dos agregados.

A maior parte dos problemas resultantes de ataques químicos surgem devido à penetração de fluidos agressivos para o interior dos poros do betão, razão pela qual a permeabilidade do betão assume particular importância. Esta penetração pode dar-se por vários mecanismos, que normalmente não se processam isoladamente, havendo quase sempre combinações entre eles. Os mais importantes são a difusão, a absorção por capilaridade e a permeabilidade:



– a difusão é um processo pelo qual um fluido (líquido, ião ou gás) passa através do betão devido a um gradiente de concentração, ou seja, é um processo que faz com que, do ponto de vista macroscópico, seja transportado um soluto das zonas de concentração mais elevada para as zonas de concentração mais baixa; neste caso, a penetração não está associada ao transporte de água para o interior do betão, como acontece com a penetração por permeabilidade ou por absorção, mas sim ao movimento dos iões na solução dos poros do betão; neste mecanismo de transporte, a presença de água nos poros é essencial, o que faz com que a penetração seja máxima nos ambientes saturados e mínima em ambientes secos; deste modo, num ambiente marítimo, a difusão assume maior importância na “zona submersa”, diminuindo sucessivamente de importância na “zona de maré”, “zona de rebentação” e “zona atmosférica”;

– a sucção capilar ou absorção é a penetração dum fluido no betão por acção de sucção da sua estrutura; os poros no betão apresentam uma grande gama de dimensões e, um líquido entra em contacto com estes, é absorvido pelas forças capilares presentes em cada poro; estas forças são inversamente proporcionais ao diâmetro dos poros, sendo que os de dimensão menor exercem uma maior força capilar (apesar da velocidade de ingresso do fluido nos poros menores ser inferior à dos de maior dimensão); o mecanismo de transporte por absorção ocorre quando a estrutura está sujeita a ciclos de molhagem/secagem por águas contaminadas por cloretos, assumindo particular importância na “zona de rebentação”;

– a permeabilidade é a propriedade de um meio poroso se deixar atravessar por um fluido sob a acção de um gradiente de pressão; a velocidade de penetração do fluido é largamente influenciada pela estrutura porosa, por fendas e pelo meio ambiente que envolve a superfície do betão; este mecanismo de transporte tem significado quando a estrutura está sujeita ao contacto de líquidos sobre pressão que contêm cloretos, como acontece nas “zonas submersas” em ambientes marítimos, onde a pressão hidrostática é relativamente elevada. Exceptuando o impacto das ondas do mar, a cavitação e a erosão do betão, as acções que mais contribuem para a deterioração de estruturas, expostas durante largos períodos de tempo num ambiente marítimo, são o ataque químico de betão e a corrosão das armaduras.

### 3.4 - Corrosão de Armaduras

Quando inserido num betão de boa qualidade, o aço encontra-se protegido dos agentes agressivos do meio ambiente tanto pelo facto de o betão constituir uma barreira física à penetração destes agentes, como pelo facto de a solução existente nos poros do betão originar a formação de uma película protectora de óxido de ferro (passivação) que impede a ocorrência de corrosão. Esta película passiva forma-se devido à alta alcalinidade da água existente nos poros do betão (com PH a rondar os 12.5 a 13.5) conferida principalmente pela dissolução de hidróxido de cálcio (produto resultante da hidratação do cimento).

Embora a passivação represente um mecanismo de protecção normal das armaduras inserida num betão de boa qualidade, pode ocorrer a destruição desta película quer pela diminuição do ph da solução existente nos poros do betão, quer devido a uma concentração de cloretos acima do teor crítico, dando-se início à corrosão do aço.

A corrosão das armaduras é um processo electroquímico, que pode ser comparado ao funcionamento de uma pilha, induzido por diferencia de potencial existentes entre as várias zonas da armadura. Na fig.3, apresenta-se um modelo simplificado de uma célula de corrosão constituída por um ânodo (zona da armadura despassivada) e um cátodo (zona da armadura não despassivada e com acesso ao oxigénio) [4]

De acordo com a fig. 3, o processo de corrosão envolve os seguintes acontecimentos [4]:

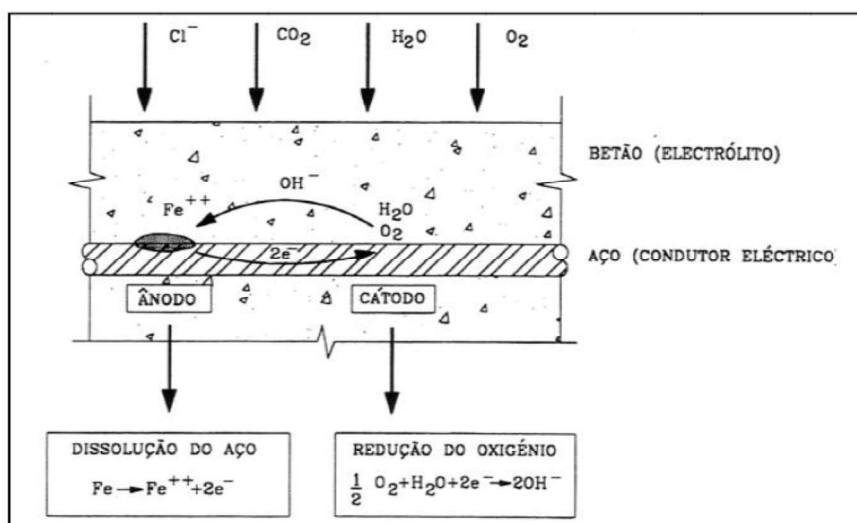


Fig. 3 – Modelo simplificado da corrosão do aço no betão [4]



- no ânodo, processa-se a dissolução do ferro em que os iões passam para a solução na forma  $Fe^{++}$ , libertando 2 electrões;
- os electrões libertados passam através da armadura (que funciona como condutor eléctrico) para o cátodo, ocorrendo a reacção destes com o oxigénio e com a água, desta reacção são originados iões de hidróxido ( $OH^-$ ) que, devido à sua elevada alcalinidade, contribuem para o reforço da película passiva na zona da armadura que funciona como cátodo;
- os hidróxidos fluem na direcção do ânodo através do betão (que funciona como electrólito) dando origem a produtos de corrosão cuja forma final depende das condições de humidade e da disponibilidade do oxigénio. Este processo origina a formação de produtos de corrosão que, por ocuparem um volume muito superior ao do ferro (fig.4), geram no interior do betão tensões muito elevadas que acabam por fendilhar, delaminar e destacar o betão de recobrimento das armaduras. A Expansibilidade dos produtos de corrosão depende essencialmente das condições de humidade e oxigénio junto às armaduras, sendo a “zona atmosférica” e a “zona de rebentação”as que conduzem à formação de produtos de corrosão mais volumosos ( $Fe_2O_3$ ,  $Fe(OH)_2$ ,  $Fe(OH)_3$  e  $Fe(OH)_3 \cdot 3H_2O$ , da Fig. 4). Este aspecto deve-se ao facto de o betão destas zonas não estar permanentemente saturado, havendo, deste modo, uma maior disponibilidade de oxigénio. Na “zonas de maré” e na “zona submersa”, pode ocorrer um fenómeno denominado por “corrosão negra”, em que, devido à dificuldade de acesso do oxigénio, a dissolução do ferro dá-se sem que haja aumento apreciável de volume.

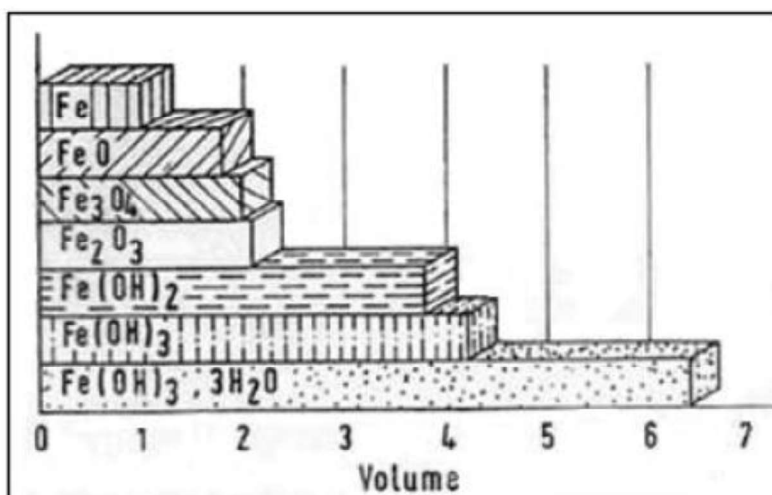


Fig. 4 - Volume relativo dos produtos de corrosão (aumento percentual) [5]



Para que o mecanismo da corrosão se possa desenvolver, têm que ocorrer simultaneamente as seguintes condições [6]:

- é necessário, em primeiro lugar, que a protecção das armaduras seja destruída, por redução do PH da solução existente nos poros, devida, por exemplo, à carbonatação, ou pela contaminação de cloretos; nas zonas onde ocorre esta situação, formam-se os ânodos.
- é necessário que ocorram diferenças de potencial na superfície das armaduras, devidas, por exemplo, a diferença na composição do betão, a diferenças de humidade e acesso de ar ou as diferenças de tensão nas armaduras;
- na zona catódica deve existir disponibilidade de oxigénio; assim, é necessário que ocorra a difusão contínua de oxigénio da superfície do betão para a zona da armadura, que funciona como cátodo;
- as zonas anódicas e catódicas devem estar ligadas eléctrica e electroliticamente de modo a que os electrões e os iões possam fluir entre elas; a malha de armaduras funciona como condutor eléctrico permitindo que os electrões fluam do ânodo para o cátodo; para que o betão funcione como electrólito, é necessário que contenha humidade suficiente.

### 3.5 - Cloretos

A contaminação de estruturas de betão armado por cloretos tem criado problemas sérios de corrosão de armaduras obrigando a que se despenda uma avultada soma de dinheiro em reparações. A Noruega constitui um caso pragmático pois, após investigar este tipo de problema, concluiu que mais de 50% de todas as grandes pontes ao longo da costa sofriam de problemas de corrosão ou já tinham sido alvo de reparações pelo mesmo efeito. A maior parte destas pontes foi construída nos últimos 25 anos e uma delas estava tão severamente corroída que isso obrigou à sua demolição [7].

Esta contaminação pode ocorrer devido à exposição do betão a ambientes agressivos (tais como os ambientes marítimos) ou devido à utilização, durante o fabrico do betão, de aceleradores do processo de cura que contenham cloreto de cálcio ou de areias da praia mal lavadas.

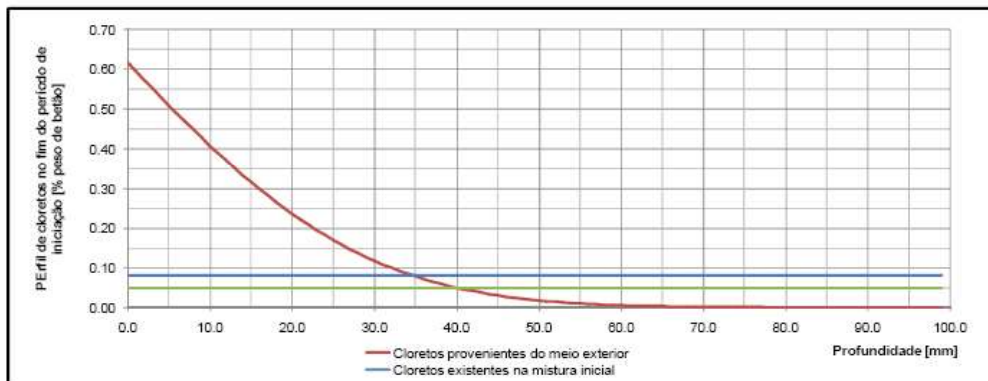


Fig. 5 - Comparação entre perfis de concentração de cloretos no tempo  $t$  [anos], para o caso em que os cloretos estão contidos na mistura inicial e o caso em que a contaminação provém do meio exterior. [7].

Quando os cloretos provêm do meio exterior, a concentração deste agente agressivo vai aumentando com o tempo até se atingir um valor que cause a ruptura localizada da película passiva (teor crítico) e, conseqüentemente, o início da corrosão. O perfil de concentração de cloretos é geralmente decrescente com a profundidade, como se pode observar na Fig. 5.

Devido à acção das águas da chuva, poderá ocorrer a lavagem do betão superficial, sendo atingido o máximo teor de cloretos no interior do betão e não à superfície (Fig. 6).

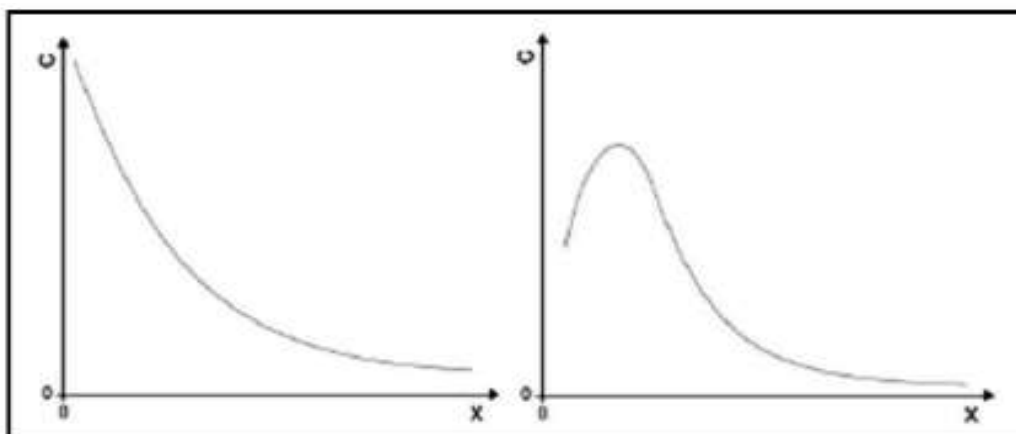


Fig.6 - Perfil de concentração de cloretos em profundidade para a situação teórica de difusão pura (à esquerda) e para a situação mais real em que há uma lavagem do betão superficial e o teor máximo é atingido no interior do betão (à direita) [7].



No segundo caso (inclusão dos cloretos durante processo de fabrico de betão), a despassivação das armaduras poderá ocorrer imediatamente e o teor de cloretos é aproximadamente constante em todo o elemento de betão (Fig. 6).

A corrosão por cloretos é caracterizada por zonas anódicas pequenas (zonas onde se deu a rotura local da película passiva) e zonas catódicas grandes (zonas passivadas localizadas geralmente perto das zonas anódicas) o que, como as correntes catódicas têm de ser iguais às correntes anódicas, conduz a velocidades de corrosão muito elevadas e a que se dêem perdas acentuadas de secção de armadura (chegam a ser superiores às perdas devido à carbonatação do betão em cerca de 10 vezes).

O teor crítico de cloretos que conduz à destruição da película passiva e, conseqüentemente, à activação do mecanismo de corrosão não é consensual e tem sido objecto de investigação desde há muitos anos. Uma das metodologias usadas geralmente neste tipo de problemas consiste em comparar o teor de cloretos existente nos poros do betão com o teor de iões hidróxido. Contudo, as conclusões obtidas com este parâmetro podem não servir de muito já que, como se pode constatar pela análise da Tabela 1, existe uma grande discrepância entre os valores limite desta relação que conduzem ao início da corrosão.

Autor	Conclusões sobre o teor crítico
Hausmann	$[Cl^-]/[OH^-] = 0.6$
Diamond e Gouda	$0.3 < [Cl^-]/[OH^-] < 0.57$
Petterson	$2.5 < [Cl^-]/[OH^-] < 6$
Lambert et al	$3 < [Cl^-]/[OH^-] < 15$ a $20$

Tabela 1 – Comparação de alguns valores da relação entre a concentração de cloretos e de hidróxidos que levará à destruição da película passiva, obtidos por vários autores (resumo de uma parte da bibliografia [4])

Tais diferenças podem ter origem em vários aspectos distintos, referidos em pormenor em [4], e que se resumem de seguida:

– os ensaios realizados em soluções artificiais podem conduzir a resultados muito diferentes dos realizados sobre a solução existente nos poros de provetes de betão; esta diferença pode ter por base o facto de a estrutura porosa da argamassa dificultar a mobilidade dos iões e facto de a película passiva numa argamassa ser bastante mais resistente do que numa solução artificial;



- a quantidade de cloretos livres necessária para despassar as armaduras é função da razão água/cimento e da humidade relativa do ambiente já que estes parâmetros influenciam activamente a porosidade do betão e, conseqüentemente, a facilidade de penetração dos cloretos e do oxigénio no betão; para além deste aspecto, o primeiro parâmetro condiciona ainda a quantidade de cloretos que é fixada pela pasta de cimento;
- a temperatura pode influenciar significativamente o teor crítico de cloretos uma vez que, segundo *Hussain et al*, o aumento da temperatura reduz a concentração de iões OH<sup>-</sup> na solução dos poros do betão e aumenta o teor de cloretos livres ao provocar a decomposição dos cloroaluminatos e de outros compostos aos quais os cloretos estavam ligados (importa referir que os cloretos podem estar quimicamente ligados aos componentes do cimento, fisicamente adsorvidos na superfície dos poros ou livres na solução existente nos poros mas que apenas os últimos contribuem para a corrosão das armaduras);
- a origem dos cloretos é outro dos parâmetros que influenciam o teor crítico, tendo-se demonstrado que, para a mesma quantidade total de cloretos, o teor de cloretos livres é maior quando estes provêm do meio exterior do que quando estes foram incorporados na massa do betão aquando do seu fabrico; deste modo, o teor crítico será inferior na primeira situação devido, possivelmente, à menor capacidade de fixação dos cloretos quando a pasta de cimento já se encontra hidratada e endurecida;
- a ocorrência de carbonatação e a presença de sulfatos fazem com que o teor de cloretos livres também aumente e, conseqüentemente, se atinja a despassivação das armaduras mais rapidamente, o que conduz a uma redução do teor crítico;
- os aditivos (micro sílica, escórias de alto forno, cinzas volantes e pozolanas) também podem influenciar o teor crítico, não havendo contudo consenso quanto ao seu efeito; assim, enquanto alguns autores defendem que a utilização de aditivos conduz a uma redução da capacidade de fixação de cloretos e, conseqüentemente, à diminuição do teor crítico de cloretos que conduz à despassivação das armaduras, outros defendem que, segundo alguns estudos realizados pelos próprios, esta adição conduz a um efeito contrário, ou seja, ao aumento desse teor.

Assim, a análise do risco de corrosão devido à contaminação de cloretos não é simples já que não existe um valor fixo do teor crítico que seja válido para todos os casos.

O ataque de cloretos tem ainda como agravante o facto de estes actuarem como catalisadores da corrosão, acelerando a velocidade da reacção química sem se alterarem no decorrer deste processo.

### 3.6 - Carbonatação

A corrosão das armaduras devida à carbonatação do betão ocorre de forma generalizada, ao invés da corrosão por ataque de cloretos que é mais localizada, e é desencadeada quando o dióxido de



carbono da atmosfera reage com o hidróxido de cálcio produzido pela hidratação do cimento. Como resultado desta reacção, o PH da água contida nos poros do betão decresce para o nível apresentado por uma solução saturada de carbonato de cálcio, ou seja, para um ph inferior a 9. À medida que a frente de carbonatação se vai aproximando das armaduras, a película passiva começa a deteriorar-se de forma generalizada e, na presença de água e oxigénio, pode-se dar início à corrosão das armaduras.

A penetração do dióxido de carbono para o interior do betão ocorre por um processo de difusão em meio gasoso. Deste modo, como a velocidade de difusão do CO<sub>2</sub> na água é muito baixa (cerca de 10<sup>4</sup> vezes inferior à velocidade de difusão no ar), a carbonatação quase não se faz notar em estruturas saturadas ou com uma humidade relativa muito elevada.

Para além do grau de saturação dos poros de betão, a permeabilidade da camada de recobrimento (que depende da relação água/cimento) e o tipo de ligante (que determina a quantidade de hidróxido de cálcio existente nos poros) são os factores que mais influenciam a velocidade de carbonatação.

### 3.7 - Ataque químico do betão

As estruturas de betão armado expostas a um ambiente marítimo, para além de serem fortemente atacadas pela corrosão de armaduras, devido principalmente à contaminação por cloretos, estão também sujeitas ao ataque químico de substâncias que provocam a deterioração da pasta de cimento, como é o caso do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), do cloreto de magnésio (MgCl<sub>2</sub>) e do sulfato de magnésio (MgSO<sub>4</sub>). O resultado deste ataque poderá ser o enfraquecimento e aumento da porosidade da pasta de cimento, quando o agente agressor é o dióxido de carbono ou o cloreto de magnésio, ou o desenvolvimento de compostos químicos agressivos (etringite ou gesso) que levam à fendilhação do betão, quando o ataque é causado por sulfatos.

O mecanismo de ataque químico é composto por duas fases, ocorrendo primeiramente a penetração das substâncias agressivas e, posteriormente, a reacção com os produtos hidratados da pasta de cimento susceptíveis de serem atacados. Assim, os parâmetros que condicionam o ataque químico são, por um lado, os que controlam a penetração das substâncias agressivas,

como é o caso da permeabilidade e possibilidade de formação de um camada protectora de aragonite e/ou brucite à superfície do betão, e, por outro, os que determinam a quantidade de produtos vulneráveis e o grau dessa vulnerabilidade



## 4 - LEGISLAÇÃO

### 4.1 - NP EN 206-1

A durabilidade das estruturas está relacionada com o meio ambiente em que estão inseridas. Nesse sentido, a NP EN 206-1 estabelece a seguinte classificação da exposição ambiental [13]:

1. Sem risco de corrosão ou ataque (X0);
2. Corrosão induzida por carbonatação (XC);
3. Corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar (XD);
4. Corrosão induzida por cloretos provenientes da água do mar (XS);
5. Ataque pelo gelo/degelo com ou sem produtos descongelantes (XF);
6. Ataque químico (XA);

O presente projecto incide no tema da corrosão induzida por carbonatação e por cloretos provenientes da água do mar. Apresenta-se a sua classificação com base na NP EN 206-1.

Designação da classe	Descrição do ambiente	Exemplos informativos onde podem ocorrer as classes de exposição
<b>1. Sem risco de corrosão ou ataque</b>		
<b>X0</b>	Para betão não armado e sem metais embebidos: todas as exposições excepto ao gelo/degelo, à abrasão ou ao ataque químico. Para betão armado ou com metais embebidos: ambiente muito seco.	Betão no interior de edifícios com muito baixa humidade do ar.
<b>2. Corrosão induzida por carbonatação</b>		
<b>XC1</b>	Seco ou permanentemente húmido	Betão no interior de edifícios com baixa humidade do ar. Betão permanentemente submerso em água.
<b>XC2</b>	Húmido, raramente seco	Superfícies de betão sujeitas a longos períodos de contacto com água. Muitas fundações.
<b>XC3</b>	Moderadamente húmido	Betão no interior de edifícios com moderada ou elevada humidade do ar.
<b>XC4</b>	Ciclicamente húmido e seco	Betão no exterior protegido da chuva. Superfícies de betão sujeitas ao contacto com a água, fora do âmbito da classe XC2.



### 3. Corrosão induzida por cloretos provenientes da água do mar

<b>XS1</b>	Ar transportando sais marinhos mas sem contacto directo com a água do mar	Estruturas na zona costeira ou na sua proximidade.
<b>XS2</b>	Submersão permanente	Partes de estruturas marítimas.
<b>XS3</b>	Zonas de marés, de rebentação ou de salpicos	Partes de estruturas marítimas.

Quadro 1 - Classes de exposição segundo a NP EN 206-1 (2005)

Efectuada a classificação da exposição ambiental é necessário conhecer os requisitos que o betão deverá respeitar com a finalidade de atribuir às estruturas uma determinada durabilidade. Para tal, recorre-se à secção 5.3 da NP EN 206-1. Nesta secção existem dois anexos com informação relativa a duas metodologias distintas: Anexo F (Metodologia Prescritiva) – referência dos limites da máxima razão A/C, mínima dosagem de cimento e mínima classe de resistência. Este anexo fornece apenas recomendações em linhas gerais, cabe a cada país abrangido pela EN 206-1, a elaboração de especificações adequadas à sua região. Em Portugal vigora a *Especificação LNEC E464 (2005)*. Anexo J (Metodologia de Desempenho) – métodos baseados no desempenho para ter em conta a durabilidade de uma estrutura de betão. Devem ser acompanhados por ensaios aprovados e modelos analíticos calibrados com situações reais. Do mesmo modo, cabe a cada país a elaboração de especificações para esta metodologia. Em Portugal pode recorrer-se à *Especificação LNEC E465 (2005)*

#### 4.2 - Norma NP EN1504

A norma EN1504, produzida pelo Comité Técnico CEN/TC 104, define os princípios da protecção e reparação das estruturas de betão que se encontram danificadas. Esta norma fornece orientação na escolha dos materiais e sistemas de reparação a utilizar, definindo requisitos mínimos a exigir para a qualidade da intervenção. A norma aborda os pontos mais importantes a considerar nas intervenções:

- Avaliação do estado em que a estrutura se encontra.



- Identificação das causas de deterioração.
- Determinação dos objectivos a atingir com a protecção e reparação.
- Escolha do(s) princípio(s) e método (s) de reparação e protecção apropriados.
- Definição das propriedades a exigir aos materiais e sistemas.
- Especificação do processo de manutenção que deve proceder a intervenção de reparação.

A norma encontra-se dividida em 10 partes, cada uma abordando diferentes temas. Mais especificamente:

- Parte 1: Definição do significado de termos relativos à reparação e protecção.
- Parte 2: Requisitos relativos a sistemas de protecção superficial do betão.
- Parte 3: Requisitos relativos à reparação estrutural e não estrutural.
- Parte 4: Requisitos relativos à colagem estrutural.
- Parte 5: Requisitos relativos à injeção de betão.
- Parte 6: Requisitos relativos à ancoragem de varões de aço.
- Parte 7: Requisitos relativos à protecção contra a corrosão do aço.
- Parte 8: Procedimentos para o controlo da qualidade e avaliação da conformidade de produtos e sistemas de protecção e reparação.
- Parte 9: Definição dos princípios gerais para o uso de produtos e sistemas de reparação, incluindo o processo de preparação da intervenção e selecção do método adequado.
- Parte 10: Especificações relativas à aplicação de produtos e sistemas e de controlo de qualidade dos trabalhos.



## 5- ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

### 5.1 - Resistência à Carbonatação

A carbonatação do betão, tal como no caso da penetração de cloretos, depende da estrutura porosa do betão e das propriedades da pasta cimentícia. Para realizar uma avaliação do desempenho do betão perante esta acção agressiva efectuam-se ensaios em que o betão está exposto a ambientes com CO<sub>2</sub>.

#### 5.1.1 - Medição da carbonatação

O método mais utilizado para a medição da profundidade de carbonatação consiste numa técnica em que se recorre a uma solução indicadora ácido-base. A mais corrente é a fenolftaleína, mas tal como a timolftaleína, é feita em solução alcoólica e permite de forma rápida, fácil e económica obter leituras da profundidade de carbonatação. A aplicação mais comum é a da fenolftaleína. O pH é uma medida da acidez ou alcalinidade de uma solução e é definido como o simétrico do logaritmo da concentração de iões H<sup>+</sup>. Na prática, a fenolftaleína reage com a fase líquida contida nos poros do betão, exibindo uma tonalidade rosa – carmim ou lilás caso o pH seja superior a 9,2 (zona de viragem da fenolftaleína). Um betão perfeitamente são tem um pH na ordem dos 13. A carbonatação tem como consequência a diminuição da alcalinidade do betão, o pH diminuirá. Caso o pH do betão tome valores inferiores a 9,2 este não irá adquirir coloração, permanece incolor, indicando que o betão está carbonatado.



Figura 7 - Corpo de prova após aspersão da fenolftaleína



A Especificação LNEC E391 estipula um procedimento para a determinação da profundidade de carbonatação.

### 5.1.2 - Ensaios para a avaliação da resistência à carbonatação

Podem realizar-se ensaios onde os provetes de betão são expostos em ambiente normal em laboratório, onde as concentrações de CO<sub>2</sub> são semelhantes às do ambiente exterior e a temperatura e humidade relativa sofrem pequenas variações. No entanto, estes ensaios não se tornam viáveis uma vez que são bastante morosos. Como alternativa, os ensaios acelerados permitem simular atmosferas enriquecidas em CO<sub>2</sub> de modo a acelerar o processo de carbonatação, sendo possível obter resultados mais rapidamente. No entanto, através destes ensaios torna-se difícil simular todos os parâmetros que intervêm no processo natural. Os resultados obtidos podem, por isso, não ser completamente fidedignos dado que o ajuste das intensidades dos agentes necessários para provocar a aceleração da carbonatação pode distorcer os resultados obtidos. Para realizar os ensaios acelerados os provetes de betão são inseridos em câmaras de carbonatação com temperatura e humidade relativa controladas e com o ambiente enriquecido em CO<sub>2</sub>. As concentrações no interior da câmara de carbonatação são da ordem dos 5%, muito superiores às concentrações em ambiente natural que rondam os 0,05-0,1%.

O objectivo dos ensaios acelerados é a previsão da evolução da carbonatação do betão em condições de exposição natural. Para tal é necessário estabelecer uma relação entre os coeficientes de carbonatação acelerados ( $k_t$ ) e o mesmo coeficiente em condições naturais ( $k_{t,n}$ ).

Existem diferenças entre os processos de carbonatação acelerada e natural que devem ser tomados em linha de conta na realização destes ensaios. Nos ensaios acelerados, os provetes estão expostos a um ou dois agentes, enquanto em condições de uso estarão certamente sob a acção de múltiplos agentes agressivos. Em condições naturais, ocorre uma melhoria contínua das propriedades mecânicas do betão devido às reacções de hidratação da pasta cimentícia, tendo como consequência a alteração contínua da estrutura porosa do betão. Ora, iria atenuar a degradação acelerada.

## 5.2 - Ensaios para avaliação da resistência à penetração dos cloretos

A determinação dos perfis de concentração de cloretos em condições de exposição natural é um processo bastante moroso. Por isso, muitos investigadores têm vindo a aplicar métodos mais rápidos



para a obtenção dos perfis de concentração de cloretos, baseados nos fenómenos de difusão e migração.

### **Difusão**

Como já referido, a difusão dos iões ocorre devido a uma diferença de concentração existente entre o betão e o meio exterior em contacto com este, na ausência de gradientes de pressão hidráulica. Ocorre uma transferência de massa por movimento das moléculas livres ou iões através da solução existente na estrutura porosa do betão, consistindo esta movimentação num fluxo das zonas de maior concentração para as zonas de menor concentração da substância que se difunde. Este fenómeno é expresso matematicamente pela equação 3.7 da 1ª Lei de Fick.

### **Migração**

A migração está associada ao movimento dos iões num electrólito devido à aplicação de um campo eléctrico exterior. Os iões movem-se no sentido oposto à carga do eléctrodo, ou seja, os iões positivos são mobilizados para o eléctrodo negativo e os iões negativos para o eléctrodo positivo, originando assim um fluxo de corrente. A acção deste campo eléctrico vai acelerar o processo de difusão dos iões. Percebe-se então que o fluxo de iões num determinado meio pode ser causado devido a gradientes de concentração (difusão), devido à acção de um campo eléctrico exterior (migração) e ainda devido a correntes de convecção. Este fluxo de iões só é possível devido à actuação de uma força de condução, resultante da acção dos diversos fenómenos de difusão, migração e convecção

## **5.3 – Ensaios à estrutura da Ponte Cais n.º 5**

No presente projecto foram efectuados os ensaios e análises á estrutura incidindo especialmente sobre :

- Determinação da largura das fissuras e fendas;
- Nivelamentos e excentricidades;
- Deformações residuais;
- Dimensões dos elementos a reforçar;
- Características e quantidades de armaduras;
- Características do betão obtidas por ensaios não destrutivos:
- Características químicas por ensaios “in situ” de carbonatação;
- Características químicas do betão por análise laboratoriais:



- a) Teor em cloretos
- b) Teor em sulfatos
- c) Teor em cimento

Estes valores são apresentados nos quadros “ III “ e “ IV “ em anexo. Respectivamente para as estacas de fundação e para a laje da superestrutura levam-nos aos seguintes resultados:

### 5.3.1 - Teor em cloretos

Os resultados dos teores em cloretos obtidos em laboratório, sobre amostras recolhidas em várias estacas e a várias profundidades a partir da superfície, apresentam uma significativa dispersão de valores, observando-se, contudo, redução da superfície para o interior.

Em função do grau de deterioração aparente da superfície, os valores máximos e mínimos (Quadro III) dos teores em cloretos observados, expressos em percentagem referidas á massa do betão, foram os seguintes:

ASPECTO da SUPERFÍCIE	(%) Cl <sup>-</sup>	Prof. (cm)
Bom	1,10	1,0 a 2,0
	0,27	4,0 a 5,0
Mau	1,03	2,0 a 3,0
	0,52	4,0 a 5,0
Médio	0,87	1,5 a 2,5
	0,59	4,5 a 5,5

Os resultados observados estão pelo menos entre cinco a vinte vezes acima dos limites estabelecidos conforme anteriormente referido. Estes valores estão de acordo com os que se têm observado em estruturas de idêntica idade em ambiente marítimo.

Com efeito a publicação em referência [8], dá conta dos resultados da observação de 51 obras com idades variáveis de 3 a 62 anos.



Os valores dos teores de cloretos obtidos em ensaios realizados no betão de carotes com 15 cm. de uma estrutura com 49 anos, construída com betão de 300 kg. de cimento por m<sup>3</sup> de betão, foram os indicados na fig. 8 seguinte:

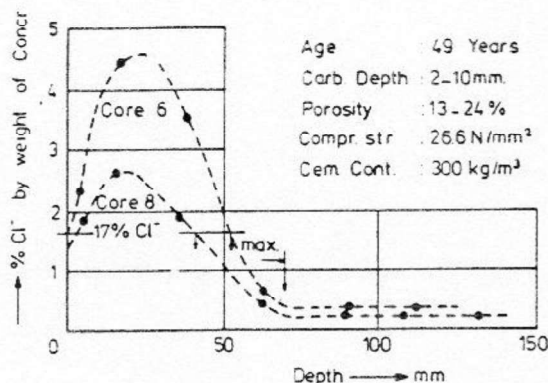


Fig. 2 - Chloride penetration into the concrete.

Fig. 8 [8]

Os valores máximos são atingidos a 2 – 3 cm da superfície do elemento coincidentes com o recobrimento das armaduras e os mínimos a cerca de 7 cm. O grau de penetração dos cloretos no betão está relacionado com a sua porosidade, característica esta que defende, essencialmente, da quantidade de cimento por metro cúbico, da qualidade dos materiais constituintes e da betonagem (em especial a relação água-cimento).

Da mesma publicação anteriormente referida [8].retirou-se a figura seguinte (9) que mostra a relação entre a profundidade de penetração dos cloretos em função da porosidade em obras com idades compreendidas entre 16 e 49 anos.

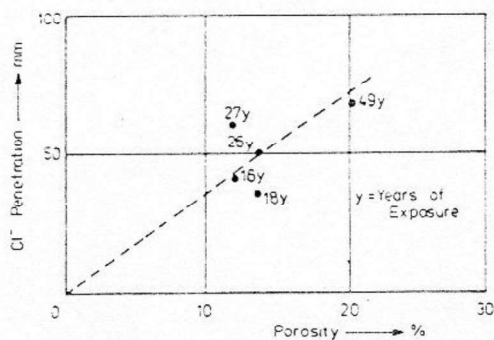


Fig. 3 - Depth of Cl-penetration versus porosity.

Fig. 9 [8]



Os valores observados na ponte cais situam-se entre os observados num caso e noutro, razão pela qual se consideram normais para a idade da estrutura.

De notar que a ponte cais foi construída com betão de 300 a 320 kg de cimento por metro cúbico de betão com um recobrimento das armaduras, medidos no local, da ordem de 2,5 a 3 cm.. Estima-se que a penetração dos cloretos com teor superior ao valor de 0,4% em relação à massa de cimento (admitindo 13,8% de teor de cimento, esse valor equivale a 0,055% em relação à massa do betão) terá atingido um máximo de cerca de 6 cm. da superfície, de modo que deverá ser esta, aproximadamente, a espessura máxima de betão contaminado a remover nas zonas mais deterioradas.

### 5.3.2 - Teor em cimento

Desprezando o valor obtido na amostra colhida na estaca “ I-6 “ do módulo “ I” que é excessivamente elevado, todos os restantes valores apresentam ordem de grandeza semelhante, cujo valor médio é de 13,8 %, que corresponde a 315 – 320 Kg. de cimento por metro cúbico de betão, um pouco acima da quantidade prevista no projecto.

### 5.3.3 - Penetração da carbonatação

A penetração da carbonatação varia de 4 a 8 mm. valores estes que são normais. Com efeito, nas 51 obras marítimas referidas na publicação [8] as penetrações da carbonatação são da mesma ordem de grandeza conforme a tabela da fig. 10.

Table 3  
Depth of carbonation observed

Depth of Carbonation	Number of Structures	Ages
0-5 mm .....	45	3-62 years
5-6 mm .....	1	8 years
6-7 mm .....	1	47 years
Up to 10 mm .....	1	47 years

Fig. 10. [8]



## **6- CARACTERIZAÇÃO DAS PATOLOGIAS**

### **6. 1 - Deterioração de Estruturas de Betão Armado**

Como se referiu, a Parte 9 da EN1504 define de forma esquemática as potenciais causas de deterioração das estruturas de betão, que se organizam de acordo com o seu efeito.

Apresenta-se de seguida uma abordagem do fenómeno e causas de deterioração, bem como de sintomas, diagnóstico e métodos de reparação propostos (os métodos são apresentados no Capítulo 7), interpretando-se e aprofundando-se a informação presente na norma.

#### **6.1.1 - Deterioração por Razões Mecânicas**

##### **6.1.1.1 - Devido a Impacto**

Fenómeno e causas: O impacto de elementos contra estruturas de betão caracteriza-se por ser uma acção de muito curta duração, mas que gera tensões elevadas na superfície do elemento e, eventualmente, esforços superiores aos resistentes.

Sintomas e diagnóstico: A inspecção visual irá detectar danos localizados na zona do impacto, como esmagamento, destaque da superfície do betão e fendilhação. A estrutura pode apresentar deformações permanentes com maior deslocamento na zona deteriorada.

Métodos de reparação: M1.3, M1.4, M3.1, M3.2, M3.3, M5.1

##### **6.1.1.2 - Devido a Carregamento Excessivo**

Fenómeno e causas: As cargas excessivas podem ser de curta duração, ou podem ter carácter mais permanente. Da acção destas cargas podem resultar esforços superiores aos resistentes e/ou deformações excessivas.

Sintomas e diagnóstico: Para um correcto diagnóstico é necessário avaliar a história e situação actual de carga a que o elemento se encontra sujeito.



A inspecção visual irá detectar a existência de fendas de flexão e/ou corte nas zonas de maiores esforços, esmagamento do betão e deformações excessivas.

Métodos de reparação: M1.3, M1.4, M3.1, M3.2, M3.3, M3.4, M4.1, M4.2, M4.3, M4.4, M4.5, M4.6, M4.7

#### **6.1.1.3 - Devido a Deslocamentos**

Fenómeno e causas: Os deslocamentos excessivos, por exemplo devido a assentamentos, geram esforços elevados nas estruturas devido às excentricidades de carga que daí resulta. Para além disso, estruturas de betão armado e elementos não estruturais são habitualmente bastante rígidos e, nos casos de deslocamentos relativos significativos, não têm capacidade de deformação para acomodar esses deslocamentos e esforços que surgem.

Sintomas e diagnóstico: A inspecção visual com apoio de levantamento topográfico irá detectar o desaprumo da estrutura e deformações elevadas, bem como danos típicos de carregamentos excessivos.

Métodos de reparação: M1.3, M1.4, M1.5, M3.1, M3.2, M3.3, M3.4, M4.1, M4.2, M4.3, M4.4, M4.5, M4.6, M4.7

#### **6.1.1.4 - Devido a Explosões**

Fenómeno e causas: A explosão é uma acção instantânea que causa danos nas estruturas de betão devido aos seguintes factores: impacto de estilhaços, sobrepressão, fluxo térmico e ondas de choque transmitidas pelo terreno. A sobrepressão tem o efeito de uma carga excessiva. O fluxo térmico causa um aumento súbito da temperatura do elemento o que pode causar a desintegração da sua superfície e a perda de resistência. As ondas de choque causam a vibração do elemento e a introdução de esforços semelhantes ao de um sismo.

Sintomas e diagnóstico: A inspecção visual irá detectar a conjugação de vários sintomas: danos generalizados na superfície por impacto de estilhaços, destacamento da superfície, fendilhação e deformação permanente do elemento. Eventualmente a superfície poderá estar chamuscada e com estilhaços incrustados.



Métodos de reparação: M1.3, M1.4, M3.1, M3.2, M3.3, M5.1

#### **6.1.1.5 - Devido a Vibrações**

Fenómeno e causas: A vibração pode ser uma acção de curta duração, como um sismo, ou pode ter um carácter contínuo e repetido, como a de máquinas a funcionar, resultando na fendilhação ou perda de resistência do elemento fadiga.

Sintomas e diagnóstico: A inspecção visual irá detectar fendilhação e destacamento da superfície do betão. No caso de uma acção repetida os defeitos concentram-se na zona geradora de vibrações.

Métodos de reparação: M1.3, M1.4, M3.1, M3.2, M3.3, M5.1

#### **6.1.2 - Deterioração por Ataque Químico**

Tal como se irá evidenciar nos pontos que se seguem, no geral, a deterioração do betão por ataque químico relaciona-se com a elevada concentração de hidróxido de cálcio que o cimento Portland conserva no seu interior para que os principais componentes hidratados mantenham a sua estabilidade [16]. Esta elevada concentração faz com que o betão seja bastante alcalino e, como tal, susceptível de sofrer os ataques que de seguida se descrevem.

##### **6.1.2.1 - Devido a Reacções Álcalis Agregado**

Fenómeno e causas: As reacções álcalis-agregado caracterizam-se pela reacção dos produtos alcalinos da hidratação do betão com alguns tipos de agregados. As reacções mais prejudiciais são as álcalis-silica que acontecem com os agregados siliciosos. Neste caso a reacção origina um composto expansivo que se deposita na superfície dos agregados. Quando o composto absorve água transforma-se num gel que vai aumentando de volume e ocupando os poros do betão gerando elevadas tensões no seu interior. Outros agregados também são reactivos em meios alcalinos, como os carbonatos, mas com consequências menos graves e mais localizadas.

Sintomas e diagnóstico: A inspecção visual irá revelar uma fendilhação mapeada e a eventual exsudação de gel à superfície. Em casos mais avançados o betão apresenta um aspecto de que está



a “inchar”. Análises petográficas irão permitir confirmar a presença de agregados reactivos. A análise de dados da obra original poderá revelar o tipo de agregado utilizado.

Métodos de reparação: M1.1, M1.2, M1.3, M1.4, M2.1, M2.2, M2.3, M2.4, M3.1, M3.2, M3.3, M3.4.

### 6.1.2.2 - Devido a Agentes Agressivos

Fenómeno e causas: Entre os agentes químicos agressivos que podem causar a deterioração do betão destacam-se os (1) ácidos, as (2) águas puras, os (3) sulfatos e alguns (4) sais. (1) Os ácidos causam a deterioração do betão, pois reagem com os compostos do cimento originando produtos solúveis em água, que serão lixiviados, originando uma perda de resistência do betão. Caso o ácido atinja as armaduras através de fendas estas irão ser igualmente afectadas. (2) As águas puras, ou seja, as águas pouco mineralizadas, misturam-se com o cálcio do betão, arrastando-o por lixiviação, decompondo assim a pasta de cimento. (3) Os iões de sulfato combinam-se com compostos do betão originando um produto chamado etringite, resultando na expansão interna da pasta de cimento e conseqüente aparecimento de tensões internas. (4) A expansão cristalina dos sais dissolvidos na água imediatamente abaixo da superfície leva ao surgimento de tensões elevadas nesta zona (a norma também se refere a este tipo de dano como acção física devido à cristalização de sais).

Sintomas e diagnóstico: Análises laboratoriais do betão e do ambiente em que este se encontra permitem conhecer com precisão as causas, os agentes agressivos e o grau de risco a que a estrutura se encontra sujeita. A inspecção visual irá detectar no caso do ataque com (1) ácidos a desintegração do betão, com perda de cimento e agregados. Caso o ácido atinja as armaduras serão visíveis manchas de ferrugem, fendilhação e delaminação. No caso de ataque por (2) águas puras, a inspecção visual irá revelar uma superfície de betão muito rugosa e por vezes com buracos nos sítios onde existiam agregados que foram arrastados. Quando o ataque é por (3) sulfatos a inspecção visual irá detectar uma fendilhação mapeada e a desintegração do betão. Por fim, no caso de (4) sais os defeitos detectados serão o destaque da superfície com exposição das armaduras.

Métodos de reparação: M1.1, M1.2, M1.3, M1.4, M1.5, M1.6, M1.7, M2.1, M2.2, M2.3, M6.1, M6.2

### 6.1.3 - Deterioração Devido a Actividade Biológica



Fenómeno e causas: Algumas espécies de bactérias podem ter o efeito de decompor o betão através da libertação de agentes agressivos, como o ácido sulfúrico, resultando num ataque químico do betão, situação comum, por exemplo, em colectores de esgotos. Numa outra escala, existem certos moluscos e vermes que podem furar o betão, em especial se o agregado utilizado for de calcário.

Sintomas e diagnóstico: Os sintomas no caso das bactérias são semelhantes ao de um ataque químico, sendo que as superfícies onde as bactérias se depositam ficam escorregadias. Análises laboratoriais irão revelar a sua existência. No caso das minhocas, pequenos furos na superfície do betão são o sintoma mais óbvio da sua existência.

Métodos de reparação: M5.1, M5.2, M6.1, M6.2

#### **6.1.4 - Deterioração Por Acção Física**

##### **6.1.4.1 - Devido a Ciclos Gelo/Degelo**

Fenómeno e causas: Embora não se trate de um problema com grande relevância em Portugal, betões saturados em zonas onde a temperatura possa descer abaixo dos 0°C correm o risco de sofrer deterioração, uma vez que a água contida nos poros expande gerando tensões internas. Ciclos consecutivos criam uma expansão que se acumula, logo tensões no interior do betão que aumentam.

Sintomas e diagnóstico: A inspecção visual irá detectar fendilhação, destacamento da superfície do betão ou mesmo a sua desintegração. A extracção de carotes de betão afectado por ciclos gelo degelo irá provavelmente revelar fendilhação interna paralela à superfície associada à expansão dos poros.

Método de reparação: M2.1, M2.2, M2.3, M2.4

##### **6.1.4.2 - Devido a Acção Térmica**

Fenómeno e causas: As variações de temperatura do elemento originam variações do volume do betão por dilatação/contracção que, quando restringidas, originam tensões.



Sintomas e diagnóstico: A inspecção visual irá revelar fendilhação regular e que poderá atravessar toda a secção, com maior incidência na zona de restrição.

Métodos de reparação: M1.3, M1.4, M1.5, M3.3, M3.4, M4.5, M4.6, M5.1

#### **6.1.4.3 - Devido à Retracção**

Fenómeno e causas: Existem dois tipos de retracção: secagem (plástica e térmica) e autogénea. A retracção de secagem é caracterizada pela perda de água do betão e variação de temperatura devido à hidratação do betão nas primeiras horas após presa. A retracção autogénea acontece ao longo do tempo, por a água inicialmente contida nos poros ir diminuindo, ao ser absorvida pelo cimento. Ambos os casos originam a diminuição de volume do betão endurecido que, se se encontrar restringida, gera tensões no elemento.

Sintomas e diagnóstico: Uma inspecção visual irá revelar a existência de fendas no betão, igualmente espaçadas, e que poderão atravessar todo o elemento.

Métodos de reparação: M1.3, M1.4, M1.5, M3.3, M3.4, M4.5, M4.6, M5.1

#### **6.1.4.4 - Devido a Erosão**

Fenómeno e causas: A erosão pode ser de dois tipos, abrasão ou cavitação. A abrasão caracteriza-se pelo efeito repetido do impacto, esfregamento ou fricção de elementos desgastantes, causando a degradação da superfície do betão. A cavitação pode acontecer na superfície de estruturas sujeitas a fluxos de água de velocidades elevadas. Este fenómeno dá-se devido à formação de bolhas de vapor que acontece quando o fluxo atinge algum tipo de obstáculo, que, por sua vez, ao atingirem zonas de pressão normal reventam. Isto representa uma redução instantânea de volume, que origina uma onda de choque que, ao atingir a superfície de betão, causa tensões elevadas numa área muito pequena. A repetição deste acontecimento origina a degradação da superfície.

Sintomas e diagnóstico: A inspecção visual irá detectar, no caso de abrasão, que a superfície se revela suave com depressões localizadas, que podem corresponder a zonas de impacto ou a zonas



de onde se soltaram agregados. No caso da cavitação a superfície encontra-se rugosa, com pequenas cavidades.

Métodos de reparação: M1.6, M3.1, M3.2, M3.3, M3.4, M5.1, M5.2

#### **6.1.4.5 - Devido a Utilização**

Fenómeno e causas: A utilização das estruturas de betão causa o desgaste natural das superfícies, num fenómeno menos intenso que a abrasão, mas com características semelhantes. A degradação acontece essencialmente por fricção.

Sintomas e diagnóstico: A inspecção visual detectará que a superfície se encontra uniformemente suavizada. Naturalmente, o conhecimento da idade da estrutura e da intensidade e tipo de utilização validarão o diagnóstico.

Métodos de reparação: M1.6, M3.1, M3.2, M3.3, M3.4, M5.1, M5.2

#### **6.2 - Deterioração Por Corrosão da Armadura**

Devido à elevada alcalinidade do betão, as armaduras encontram-se protegidas contra a corrosão por uma camada de óxido que se deposita na superfície do aço e que se mantém estável para pH superior a 9.5 em ambientes pobres em cloretos. Chama-se a esta camada película passiva. Quando esta camada é destruída, a armadura fica despassivada e pode dar-se a corrosão. A corrosão do aço é um processo electroquímico, que envolve a transferência de electrões entre um ânodo (zona de armadura desprotegida) e um cátodo (zona de armadura com acesso a água e oxigénio). Do ponto de vista químico, no ânodo, o aço dissolve-se cedendo iões de ferro e electrões ( $\text{Fe} = \text{Fe}^{2+} + 2e^-$ ). Os iões de ferro difundem-se no meio electrolítico (betão húmido) e combinam-se com o hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ) e depois com oxigénio e água formando o óxido de ferro, que constitui a ferrugem. Uma vez que o cátodo é um eléctrodo de potencial mais baixo que o ânodo, os electrões migram até este ponto onde se combinam com a água e o oxigénio formando o hidroxilo. A velocidade de corrosão depende do acesso ao oxigénio e do teor de humidade no cátodo e da resistividade do betão.



Durante o processo de corrosão, no ânodo verifica-se uma redução de secção transversal do varão e a deposição de subprodutos da corrosão, a ferrugem, o que representa um aumento de volume e aparecimento de tensões no interior do betão, gerando a delaminação da sua superfície, ou seja, o seu destacamento.

Para se compreender melhor o fenómeno é preciso considerar que a ferrugem tem um volume 2 a 6 vezes maior que o ferro que a originou, o que resulta numa pressão que pode ser 20 vezes superior à tensão de tracção resistente do betão [24]. Ao analisar um varão corroído há que considerar que a redução efectiva de secção é 4 vezes menor do que a quantidade de ferrugem depositada. A delaminação constitui uma forma de degradação do betão e proporciona um mais fácil acesso da armadura a oxigénio e humidade, aumentando assim a velocidade de corrosão.

### **6.2.1 - Devido a Carbonatação**

Fenómeno e causas: A camada de protecção passiva das armaduras é destruída pelo abaixamento do pH do betão (para valores inferiores a 9.5), que acontece quando o dióxido de carbono da atmosfera penetra na estrutura e reage com o cálcio e outros compostos de hidratação do cimento que são alcalinos, originando carbonato de cálcio. Inicia-se assim a corrosão das armaduras, que neste caso é habitualmente generalizado a grandes áreas. Trata-se de um processo lento de difusão que depende da qualidade do betão.

Sintomas e diagnóstico: A inspecção visual irá revelar manchas de ferrugem na superfície do betão, fendilhação segundo linhas paralelas, com intervalos constantes e alinhada com as armaduras. Em estados mais avançados será detectada a delaminação do betão com eventual exposição das armaduras. Análises químicas simples de carotes ou furos irão permitir conhecer a profundidade da carbonatação, por análise do pH do betão. O processo mais habitual é a aspersão de solução alcoólica de fenolftaleína, que fica incolor para pH inferior a 9.0 (zona carbonatada).

Métodos de reparação: M1.1, M1.2, M1.3, M1.4, M1.5, M1.6, M1.7, M2.1, M2.2, M2.3, M2.4, M7.1, M7.2, M7.3, M7.4, M8.1, M9.1, M10.1, M11.1, M11.2, M11.3.

### **6.2.2 - Devido a Correntes Vagabundas**

Fenómeno e causas: A corrosão das armaduras pode acontecer nos casos em que a corrente necessária para haver uma diferença de potencial entre o cátodo e o ânodo é fornecida por uma fonte externa. Neste caso o fluxo de electrões necessário para a corrosão acontecer é fornecido por



elemento externo como um gerador ou linhas de tensão. Este caso pode acontecer em viadutos ou túneis ferroviários.

Sintomas e diagnóstico: Os sintomas e diagnóstico são idênticos aos da corrosão devido a carbonatação, com fendilhação e delaminação do betão. O conhecimento da estrutura e sua utilização ajudam a determinar a existência de fontes de corrente externas. Se existir isolamento eficaz entre a fonte de tensão e o betão e ligação entre as armaduras e a terra para descarga das tensões, é pouco provável tratar-se desse fenómeno. A avaliação deve também passar pela medição do potencial dos elementos de aço relativamente ao meio ambiente e da intensidade da corrente que circula nas estruturas.

Métodos de reparação: M2.1, M2.2, M2.3, M2.4, M8.1, M9.1, M10.1, M11.1, M11.2, M11.3

### **6.2.3 - Devido a Contaminantes Agressivos**

#### **6.2.3.1 - Cloretos Presentes na Mistura**

Fenómeno e causas: Os cloretos podem estar na constituição do betão ainda antes deste entrar em serviço se tiverem sido introduzidos na mistura, por exemplo, através da utilização de agregados de praia. Caso a quantidade de cloretos no betão seja superior a um valor crítico (0.4% do peso de cimento [28]) a película passiva é destruída podendo acontecer a corrosão localizada das armaduras.

Sintomas e diagnóstico: A inspecção visual irá revelar manchas de ferrugem (mais localizadas do que no caso da carbonatação) na superfície do betão, fendilhação segundo linhas paralelas, com intervalos constantes e alinhada com as armaduras. Em estados mais avançados será detectada a delaminação do betão com eventual exposição das armaduras. Análises químicas de pó extraído dos betões permitem conhecer a quantidade de cloretos presentes.

Método de reparação: M2.1, M2.2, M2.3, M2.4, M7.2, M7.5, M8.1, M9.1, M10.1, M11.1, M11.2, M11.3

#### **6.2.3.2 - Cloretos com Origem no Ambiente Exterior**

Fenómeno e causas: Tal como no ponto anterior, os cloretos provocam a corrosão por destruição da película passiva. A penetração dos cloretos depende da permeabilidade e grau de saturação do



betão e do teor de cloretos no meio exterior e pode acontecer de duas formas distintas: difusão em solução aquosa em casos de humidade elevada ou sucção capilar em casos de humidade reduzida. É importante definir a origem dos cloretos para prever meios de protecção contras futuras penetrações.

Grande parte das estruturas construídas em ambiente marítimo estão sujeitas à acção dos cloretos, pelo que a sua durabilidade exige a adopção de medidas de protecção especiais e elevados recobrimentos das armaduras. Os elementos estruturais sujeitos a ciclos de molhagem/secagem ou em zonas de rebentação são os mais propensos à deterioração, devido à elevada concentração de cloretos que acumulam e ao fácil acesso a oxigénio e humidade.

Sintomas e diagnóstico: Idêntico ao ponto anterior.

Método de reparação: M1.1, M1.2, M1.3, M1.4, M1.5, M1.6, M1.7, M2.1, M2.2, M2.3, M2.4, M7.5, M8.1, M9.1, M10.1, M11.1, M11.2, M11.3

### **6.2.3.3 - Outros Contaminantes**

Fenómeno e causas: Outros contaminantes químicos podem actuar directamente nas armaduras levando à sua corrosão.

Sintomas e diagnóstico: A inspecção visual irá detectar as consequências típicas da corrosão, nomeadamente, a sua fendilhação e delaminação. Uma análise química do betão e do ambiente em que se insere permitem conhecer o tipo de contaminantes.

### **6.2.3.4 - Defeitos não Mencionadas na NP EN1504-9**

Existem algumas causas de deterioração mencionadas na bibliografia sobre o assunto que a EN1504- 9 não refere, nomeadamente, erros de construção e de projecto, a acção do fogo, defeitos específicos de sistemas de pré-esforço e outros.

Também não se refere a possibilidade de corrosão galvânica. Este tipo de deterioração acontece quando dois tipos de metal diferentes estão electricamente em contacto na presença de um electrólito. O que acontece é que o metal com maior potencial força a corrosão do outro aço.



### 6.2 - Relação Existente Entre Sintomas e Causas de Deterioração

Na tabela 2 que se apresenta relaciona-se de forma genérica os sintomas mais facilmente identificáveis em estruturas deterioradas com as causas de deterioração referidas neste capítulo.

Defeitos	Causas	Sintomas				
		Fendilhação	Delaminação	Desintegração	Deformação	Desgaste
Deterioração do betão	Impacto (pag. 5)	X		X	X	
	Cargas excessivas (pag. 6)	X			X	
	Deslocamento (pag. 6)	X			X	
	Explosão (pag. 7)	X	X	X	X	
	Vibração (pag. 7)	X	X			
	Reacção alcalis (pag. 8)	X		X		
	Agentes agressivos (pag. 9)	X	X	X		X
	Agentes biológicos (pag. 10)	X		X		
	Ciclos gelo-degelo (pag. 10)	X	X	X		
	Acção térmica (pag. 11)	X			X	
	Retracção (pag. 11)	X				
	Erosão (pag. 12)			X		X
	Utilização (pag. 13)			X		X
Deterioração por corrosão da armadura	Carbonatação (pag. 14)	X	X			
	Correntes vagabundas (pag. 15)	X	X			
	Cloretos da amassadura (pag. 15)	X	X			
	Cloretos do ambiente exterior (pag. 16)	X	X			
	Outros contaminantes (pag. 17)	X	X			

Tabela 2 – Relação entre fenómenos de deterioração e sintomas visíveis [11].

Na tabela que se segue relacionam-se os tipos de deterioração com os métodos de intervenção existentes:





## 7 - DIAGNÓSTICO DAS ESTRUTURAS DA PONTE CAIS

### 7.1 - Situação da ponte cais

No caso particular da estrutura da ponte cais, os resultados das observações detalhadas executadas estaca a estaca, painel a painel da superfície inferior da laje da superestrutura, estão referenciadas nos quadros I e II em anexo.

A inspecção visual foi realizada por uma equipa constituída por um Engenheiro civil, um desenhador e um auxiliar numa pequena embarcação tirando o máximo partido dos períodos de marés baixas e em condições favoráveis de agitação das águas.

Foi também efectuado um registo fotográfico em zonas mais caracterizadas, quer da estrutura, quer das estacas.

Do quadro (III) apresenta-se uma síntese dos resultados das inspecções realizadas, quer da inspecção subaquática de um conjunto seleccionado de 50 estacas efectuadas por mergulhadores equipados com câmara de vídeo ligada em circuito fechado.

As principais conclusões dessa inspecção subaquática foram as seguintes:

- a) Em apenas 10 estacas, ou seja 20% ocorre corrosão abaixo do nível da BMAV, contudo, em apenas metade destas 10% é que a corrosão do fuste imerso atinge profundidade significativa.  
Em duas das estacas (12H e 13F) verificou-se que a secção do núcleo está totalmente afectada pelo que se encontram fora de serviço.
- b) 15 das estacas, ou seja 30%, apresentam as superfícies dos fustes com bastante bom aspecto, praticamente sem sinais de corrosão, mesmo na zona de variação da maré.
- c) Nas restantes 25 estacas, ou seja 50%, ocorre corrosão mais ou menos intensa na zona da variação da maré.



foto 1 – Aspecto visual de estacas do tabuleiro I



foto 2 – Pormenor do fuste das estacas e juntas de dilatação das lajes da plataforma do cais



**Foto 3** – Pormenores de estacas e laje



**foto 4** – Estacas deterioradas



**foto 5** – Pormenor de estaca cota 3,10m



**foto 6** – Estaca fora de serviço



**foto 7** – Pormenor estacas deterioradas



**foto 8** – Pormenor de laje a demolir e a reconstruir

A deterioração observada nas estacas referidas em a) terá sido, principalmente resultante de condições especiais durante a fase de construção, e de funcionamento da estrutura, que terão provocado maior fissuração das secções de betão e, nestas condições, essas estacas teriam ficado em situação mais propícia para a deterioração num ambiente marítimo muito agressivo.

Estas anomalias são confirmadas através do “Relatório Sobre Cravação de Estacas” obtido através da SETH – Sociedade de Empreitadas e Trabalhos Hidráulicos SA, onde este relatório evidenciava as enormes dificuldades surgidas durante a cravação das estacas, pelo facto de se verificar a tendência para elas se partirem por flexão ao serem cravadas em talude com solos consistentes. No final da empreitada de cravação de estacas verificou-se que o total de estacas partidas foi de 29 und. (21 c/ Ø 32cm. e 8 c/ Ø 40 cm.) das quais 3 Ø 40 cm e 4 Ø 32 cm. foram emendadas, enquanto as restantes terão sido substituídas.

Passando a caracterizar a amplitude e dimensão da observação das anomalias detectadas na totalidade das estacas, temos que:



- Estacas fora de serviço - ..... 7
- Estacas deterioradas acima da PMAM - ..... 319
- Estacas deterioradas na zona de variação da maré acima de + 1,50 m. - ..... 163
- Estacas deterioradas entre + 1,50 e 2,00 m - ..... 32
- Estacas deterioradas abaixo do Z. H. ( \*) - ..... 11
- Estacas sem deterioração - ..... 50

( \* ) – Inspeção recorrendo a meios de observação subaquáticos.

Ou seja, que em 198 estacas estas apresentam mais do que um troço a reparar.

### 7.1.1 – Fundações

#### – Estacas fora de serviço:

Foram detectadas no total sete estacas fora de serviço, três das quais na inspeção subaquática e quatro na inspeção visual, sendo provável que mais algumas estacas se encontrem em idêntica situação.

A inspeção subaquática foi efectuada em apenas 50 estacas.

#### – Estacas deterioradas no topo (acima da cota + 3,0 m.):

Verificou-se que 319 das 403 estacas (ou seja 79%) se encontravam deterioradas junto ao encastramento na laje num comprimento médio de 0,50 m.

#### – Estacas deterioradas na zona de variação da maré (acima da cota + 1,50 m. entre BMAM e PMAM):

Verificou-se que 163 das 403 estacas (40 %) se encontravam deterioradas acima da cota + 1,50 m. num comprimento médio de 92 cm.



– Estacas deterioradas entre 1,5 m. e o Z.H.:

Observou-se que quase todas as 163 estacas anteriormente referidas a deterioração prosseguia abaixo da linha de água, não sendo contudo possível identificar em que extensão.

Na inspecção subaquática observou-se que em 25 das estacas observadas (50 %) existe corrosão na zona de variação das marés.

– **Estacas deterioradas abaixo do Z.H.:**

Conforme referido a deterioração das estacas abaixo do Z.H. teve mais a ver com as dificuldades construtivas observadas durante a execução dos trabalhos de cravação, do que com a corrosão em ambiente marítimo. Não foi possível determinar a quantidade total de estacas nesta situação.

– **Estacas sem indícios de corrosão:**

Foram detectadas apenas 50 estacas sem indícios de deterioração do conjunto de inspecções.

Poderão eventualmente que algumas destas estacas se encontrem deterioradas abaixo da cota BMAM.

### 7.1.2 – Superstrutura

No quadro “ II “ apresenta-se um mapa com a caracterização e quantificação dos seguintes tipos de deterioração ocorrida :

#### 1 – Galeria “ I “ a “ IV “ :

- Áreas com armaduras corroídas à vista.
- Áreas com betão solto.
- Comprimentos de juntas de dilatação e de betonagem deteriorados.
- Comprimentos de bordadura de laje destruída.
- Comprimentos de laje fissurada



## 2 - Galeria “ V “:

Nesta galeria em que esta laje de betão armado simplesmente apoiada, apresenta como função a transição entre a ponte cais e o terraplino, apresentando-se os valores das anomalias observadas em percentagem de área total da respectiva laje.

Da análise dos resultados obtidos mostram-nos que a laje do tabuleiro do cais (galeria I a IV) se encontra de um modo geral, para a idade (cerca de 50 anos) em relativo bom estado com deteriorações localizadas.

Com efeito, a área total deteriorada com as armaduras à vista ou com o betão de recobrimento provavelmente solto têm cerca de 55,0 m<sup>2</sup> o que representa apenas 1,7 % da área total. Este resultado evidencia a vantagem de se optar em obras marítimas a concepção de “ laje vigada invertida “ por oferecer uma menor superfície exposta à acção agressiva das águas e ainda a ausência de arestas. De realçar que grande parte das deteriorações observadas estão relacionadas com aberturas na laje (juntas e furos de drenagem), onde ocorrem escorrimentos de águas.

O bordo da laje na frente marítima também apresenta significativa deterioração requerendo reparação em 32% da sua extensão total.



## 8 - DETERMINAÇÃO DAS CAUSAS

Na posse do diagnóstico da situação, com a análise do comportamento da estrutura, e das suas diversas peças, passa-se à segunda etapa: - A determinação das causas.

Somente com o conhecimento pleno dos agentes motivadores das anomalias é que se poderá suste-las, tratá-las e eliminá-las, procedimento aliás que deverá constar de projecto pormenorizado de recuperação e reforço se necessário, sendo sem dúvida indispensável à boa execução dos trabalhos.

Certas anomalias surgem em conjunto e o registo de uma só dessas anomalias poderia alterar o julgamento das suas causas e conseqüentemente conduzir à patologia errada e o método de reabilitação seria desastroso.

Assim, e de acordo com o com o procedimento adoptado na gestão de obras de arte na detecção e caracterização das causas a que correspondem as respectivas patologias, as quais agregando-se, e procedendo a ensaios, análises á estrutura e verificação do projecto inicial da obra, (quer na composição dos materiais aplicados quer em técnicas de execução) poder-se-á finalmente, determinar as causas das anomalias nas estruturas.

No caso concreto da ponte cais e atendendo ao relatório do empreiteiro que executou a obra em 1957, este descreve o processo e ainda algumas das dificuldades encontradas durante a cravação das estacas (fotos 9 e 10).

Estas dificuldades resultaram da tendência de algumas das estacas inclinadas se partirem por flexão ao serem cravadas em solos resistentes á sua penetração. Estes sinais são apresentados no relatório atrás referido tendo como resultado 29 estacas partidas durante a cravação, tendo 7 destas sido emendadas e as restantes substituídas.

Também resultado do modo construtivo de cravação por apiloamento, cerca de 79% do total das estacas encontram-se deterioradas no fuste junto ao encastramento na laje. Esta anomalia teria provocado fissurações, as quais teriam contribuído para que estas estacas ficassem em situação mais propícia para uma rápida deterioração, num ambiente marítimo agressivo.



Foto 9



Foto 10

Resultante também de um deficiente método de fabrico das estacas pré-fabricadas “in situ” que como se poderá perfeitamente verificar pela foto 11 o processo de cofragem e de betonagem das estacas apresenta deficiências ao longo de toda a estaca apresentando indícios de segregação durante o processo de cura do betão. Este fenómeno origina uma maior deterioração da estaca ao longo de uma faixa longitudinal da estaca conforme se poderá facilmente observar na foto 12.



Foto 11



Foto 12

Outra das causas que originaram o aparecimento de estacas destruídas e conseqüentemente fora de serviço, relacionam-se com a ocorrência de acidentes resultantes da colisão esporádicas de navios com a ponte cais.

Um dos casos mais graves é retractado em anexo mostrando como resultado final o estado do navio “SUMMER LIGHT” (foto 13) e da estrutura danificada (foto 14).



Foto 13



Foto 14

Com menor gravidade, mas também como causa do estado de degradação de estacas e do tabuleiro é o facto da ponte cais não possuir as defensas necessárias para absorver os esforços no impacto dos navios sobre a estrutura durante as manobras de atracamento (Foto 14).

Esta estrutura como grande parte das estruturas construídas em ambiente marítimo está sujeita à acção dos cloretos e sulfatos, pelo que a sua durabilidade exigia a adopção de medidas de protecção especiais e elevados recobrimentos das armaduras. Aliado à baixa dimensão do diâmetro das estacas e ao conseqüente baixo recobrimento das armaduras a acção da penetração de cloretos também se reflectiu na deterioração do betão das estacas e lajes da estrutura. Ainda os elementos estruturais da ponte cais sujeitos a ciclos de molhagem/secagem ou em zonas de rebentação foram os mais propensos à deterioração, devido à elevada concentração de cloretos (entre 5 a 10 vezes mais) e sulfatos que acumulam e ao fácil acesso a oxigénio e humidade.

A inspecção visual a estes elementos revelou manchas de ferrugem (mais localizadas na presença de cloretos e sulfatos do que no caso da carbonatação) na superfície do betão, fendilhação segundo linhas paralelas, com intervalos constantes e alinhada com as armaduras.

Em estados mais avançados foi detectada a delaminação do betão com eventual exposição das armaduras.



## **9 - METODOLOGIAS PARA A REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS DE BETÃO ARMADO**

### **9.1 - Protecção e Reparação de Estruturas de Betão de Acordo com a Norma NP EN1504.**

#### **9.1.1 - Escolha do Método de Intervenção**

De acordo com a Parte 9 da norma NP EN1504 existem vários métodos possíveis de protecção ou reparação a adoptar para uma estrutura de betão, de acordo com os objectivos que se pretendam alcançar com a intervenção. A escolha do método de reparação é, de acordo com a norma, a parte mais importante do processo [11].

São assim especificadas as opções base a considerar para a intervenção [11]:

- Não fazer nada durante um certo tempo.
- Reanálise da capacidade estrutural com eventual aceitação da menor capacidade resistente e modificação da utilização da estrutura.
- Prevenção ou redução de deterioração futura, sem melhoria da resistência da estrutura de betão.
- Melhoria, reforço ou reabilitação total ou parcial da estrutura de betão.
- Reconstrução total ou parcial da estrutura de betão.
- Demolição total ou parcial da estrutura de betão.

Desta forma é possível delinear uma estratégia de intervenção. Um outro aspecto importante que a norma acrescenta é a especificação dos factores a considerar na escolha do método de reparação, de modo a salvaguardar eventuais situações inesperadas. Os factores a considerar são os seguintes [11]:

- O uso e o tempo de vida útil desejado para a estrutura.
- Os requisitos para um comportamento desejável da estrutura.



- O desempenho esperado no longo prazo da intervenção.
- A possibilidade de se realizar uma protecção ou reparação adicionais com o método adoptado.
- O número e custos aceitáveis dos ciclos de reparação da estrutura durante o seu período de vida útil.
- O custo e a viabilidade de métodos alternativos de protecção ou reparação, incluindo custos futuros de manutenção e acesso.
- Propriedades e métodos possíveis para a preparação da estrutura para a intervenção.
- A estética da intervenção.
- Considerações de higiene e segurança, não só durante a intervenção, mas no longo prazo para os utilizadores da estrutura. A escolha de soluções para a intervenção, optando por aquelas que representem um risco de segurança mais reduzido durante a obra, a opção por materiais menos tóxicos, são exemplos efectivamente condicionados por estes aspectos.
- Considerações estruturais relacionadas com a segurança da intervenção, a utilização da estrutura e o risco de alteração do seu comportamento estrutural.
- Possibilidade de proteger a estrutura de ambientes agressivos.

Por fim, especifica-se na norma que a intervenção adoptada deverá estar de acordo com os seguintes requisitos [11]:

- Ser apropriada para o tipo, causa ou combinações de causas e extensão dos defeitos.
- Ser apropriada para as condições de utilização futuras.
- Ser apropriada à opção de protecção ou reparação adoptadas.
- Estar de acordo com os princípios presentes na parte 9 da norma NP EN1504.
- Recorrer à utilização de sistemas e produtos que estejam de acordo com as especificações da norma NP EN 1504 ou qualquer outra norma relevante.



Desta forma se percebe que a escolha do método mais adequado não pode ser tomada unicamente com base em aspectos técnicos: há que considerar aspectos de ordem económica, ambiental e social.

São estas as considerações a ter em conta no início do processo de escolha, dimensionamento e especificação da intervenção. Naturalmente, trata-se de orientações gerais mas que servem para estabelecer uma linha de pensamento, que pretende definir de forma integrada todo o processo de intervenção.

### 9.1.2 - Considerações de Ordem Ambiental

Para além dos aspectos de ordem técnica, são os aspectos relacionados com a economia da solução, aquelas que mais condicionam a escolha dos métodos de intervenção. No entanto, são cada vez maiores as imposições e preocupações ambientais relacionadas com a construção civil.

A preservação e reabilitação de estruturas, especialmente de estruturas de betão armado, representa uma grande poupança ambiental. A substituição de uma estrutura deteriorada por uma estrutura nova implica um grande impacto ambiental que deverá ser devidamente equacionado. Não só a demolição de uma estrutura representa a criação de uma grande quantidade de resíduos dificilmente recicláveis, como a construção de uma nova estrutura implica a produção de cimento e aço, processos que consomem grandes quantidades de energia.

No que respeita à intervenção de protecção ou reparação, a consideração dos impactos ambientais deverá ser realizada de forma sistemática e expedita por verificação de alguns aspectos base, que embora não sejam referidos na norma NP EN1504, se considera da maior importância referir:

- Identificação e preservação de recursos naturais protegidos.
- Verificação da existência e cumprimento de imposições ambientais desde o início do processo de escolha dos métodos.



- Previsão e consideração de efeitos secundários inesperados da intervenção no curto e longo prazo.

A concretização destas verificações poderá ser conseguida por recurso ao seguinte método:

- realização de inventário das condições ambientais existentes antes da intervenção, de modo a identificar recursos a manter.
- identificação de impactos negativos com apoio de uma equipa de especialistas ambientais, considerando outras alternativas para a intervenção.
- identificação de medidas preventivas ou mitigadoras dos impactos negativos.

### **9.1.3 - Princípios e Métodos de Protecção e Reparação**

De acordo com a norma NP EN 1504 os métodos de reparação são agrupados em função do princípio definido para a intervenção. Desta forma, apenas os métodos que estejam de acordo com os 11 princípios definidos poderão ser utilizados.

Os princípios 1 a 7 estão relacionados com a deterioração do betão, enquanto os restantes se relacionam com a corrosão das armaduras.

De seguida apresentam-se todos os métodos de protecção ou reparação especificados nesta norma:



Princípios	Métodos de Protecção e Reparação
P1 [PI] - Protecção contra o ingresso de agentes agressivos	M1.1 Impregnação
	M1.2 Revestimento superficial com ou sem capacidade de suportar movimento de fendas
	M1.3 Fendas localmente tapadas
	M1.4 Preenchimento de fendas
	M1.5 Transformação de fendas em juntas
	M1.6 Colocação de painéis externos
	M1.7 Aplicação de membranas
P2 [MC] - Controlo da humidade	M2.1 Impregnação hidrofóbica
	M2.2 Revestimento superficial
	M2.3 Protecção física ou camada de recobrimento
	M2.4 Tratamento electroquímico
P3 [CR] - Substituição do betão	M3.1 Aplicação à mão de argamassa
	M3.2 Nova betonagem
	M3.3 Projecção de argamassa ou betão
	M3.4 Substituição de elementos
P4 [SS] - Reforço estrutural	M4.1 Adição ou substituição de armaduras externas ou internas
	M4.2 Colocação de armaduras em furos existentes ou a realizar
	M4.3 Colagem de chapas
	M4.4 Colocação de argamassa à mão
	M4.5 Injecção de fendas, vazios ou interstícios
	M4.6 Enchimento de fendas, vazios ou interstícios
	M4.7 Pré-tensão ou pós-tensão
P5 [PR] - Resistência física	M5.1 Camadas de recobrimento ou revestimento
	M5.2 Impregnação
P6 [RC] - Resistência ao ataque químico	M6.1 Camadas de recobrimento ou revestimento
	M6.2 Impregnação
P7 [RP] - Preservação ou restituição da camada passiva das armaduras	M7.1 Aumento do recobrimento com argamassa ou betão
	M7.2 Substituição de betão contaminado ou carbonatado
	M7.3 Realcalização electroquímica do betão carbonatado
	M7.4 Realcalização do betão carbonatado por difusão
	M7.5 Extracção electroquímica dos cloretos do betão
P8 [IR] - Aumento da resistividade do betão	M8.1 Limitação do teor de humidade no betão por tratamentos superficiais, revestimento ou protecção física
P9 [CC] - Controlo catódico	M9.1 Limitação do teor de oxigénio no cátodo por saturação do betão ou revestimentos superficiais
P10 [CP] - Protecção catódica	M10.1 Aplicação de potencial eléctrico
P11 [CA] - Controlo das áreas anódicas	M11.1 Pintura das armaduras com tintas que contenham pigmentos activos
	M11.2 Pintura das armaduras com tintas de funcionem como barreiras
	M11.3 Aplicação de inibidores de corrosão no betão

Tabela 4 [11].



**O Princípio 1** – Protecção Contra o Ingresso de Agentes Agressivos, relaciona-se com intervenções de protecção e prevenção em relação a agentes agressivos como sais, ácidos e gases, que levam à deterioração das estruturas de betão. A penetração dos agentes é bastante rápida através de fendas ou de um betão muito poroso. De acordo com este princípio estes canais de acesso deverão ser bloqueados.

**O Princípio 2** – Controlo da Humidade, permite limitar certos tipos de deterioração da estrutura, uma vez que a corrosão, as reacções álcalis-silica e os ciclos gelo degelo necessitam de água para acontecer.

**O Princípio 3** – Substituição do Betão, deverá ser utilizado em casos em que o betão se encontre significativamente deteriorado, devido, por exemplo, a delaminação por corrosão das armaduras, ataque químico, impactos...

**O Princípio 4** – Reforço Estrutural, a utilizar em casos em que o nível de deterioração é tão extenso que a estrutura se encontra limitada na sua função estrutural.

**O Princípio 5** – Resistência Física, é aplicável nos casos em que se pretende aumentar a resistência da estrutura ao desgaste superficial e possibilidade de impactos.

**O Princípio 6** – Resistência ao Ataque Químico, pretende dotar as estruturas de uma maior capacidade de suportar ataque químico.

**O Princípio 7** – Preservação ou Restituição da Camada Passiva das Armaduras, que deverá ser utilizado nos casos em que as armaduras se encontram despassivadas ou em processo de despassivação, evitando ou limitando assim a corrosão.

**O Princípio 8** – Aumento da Resistividade do Betão, pretende diminuir o risco ou evolução da corrosão das armaduras limitando as trocas entre o ânodo e o cátodo, por exemplo, por uma diminuição do grau de humidade do betão.

**O Princípio 9** – Controlo Catódico, visa impedir a formação de uma zona catódica, para que não se dê o processo electroquímico que origina a corrosão nas zonas anódicas.

**O Princípio 10** – Protecção Catódica, implica a criação de um sistema que impeça a formação de zonas anódicas. Este objectivo poderá ser alcançado colocando um elemento que irá funcionar como ânodo, que pode ser um ânodo sacrificial, ou por imposição de um campo eléctrico negativo fornecido por uma fonte de alimentação externa em simultâneo com a colocação de um ânodo na superfície do elemento de betão.

**O Princípio 11** – Controlo das Área Anódicas, é utilizado para prevenir a formação de zonas anódicas no aço, recorrendo à sua protecção com inibidores de corrosão.



## 9.2 - Preparação dos Trabalhos

### 9.2.1 - Requisitos a Verificar Antes das Intervenções

Na Parte 9 da norma NP EN1504 são definidos os requisitos mínimos a garantir antes de se proceder à protecção e reparação de uma estrutura de betão, relativos à segurança dos trabalhos e à avaliação da deterioração e suas causas.

No que toca ao primeiro aspecto, a segurança, os trabalhos de reparação não apresentam particularidades especiais relativamente a uma obra corrente, com a excepção da necessidade de se considerar a diminuição da capacidade resistente nos casos em que são retirados betão ou armaduras deterioradas e a necessidade de prever a eventual queda de destroços durante trabalhos de demolição.

Relativamente à avaliação da deterioração a norma é muito breve, definindo os aspectos mais importantes a considerar: avaliação dos defeitos da estrutura, das suas causas e da capacidade da estrutura deteriorada cumprir a sua função. A norma estabelece que o processo de avaliação deve, no mínimo, incluir a definição dos seguintes aspectos [11]:

- a) Levantamento das condições actuais da estrutura, incluindo defeitos não visíveis ou potenciais (considera-se importante a realização de um mapeamento das anomalias, após campanha de ensaios e testes)
- b) Método de dimensionamento original.
- c) Caracterização das condições de exposição ambiental (classificação de exposição de acordo com o Eurocódigo 2).
- d) Condições existentes durante a construção original, incluindo condições climatérica (caso exista, a ficha técnica da obra pode dar informações importantes acerca de materiais utilizados, análises de água de amassadura do betão, tipo de agregados, condições de execução, etc.).
- e) Historial da estrutura (especial importância para definição de acções e tipo de utilização dada à estrutura).
- f) Condições de utilização (avaliando as acções e utilização actual da estrutura).
- g) Definição dos requisitos para o uso futuro da estrutura.



A norma estabelece em anexo que, após a avaliação da estrutura e da identificação das anomalias, deverão ser realizados ensaios e testes laboratoriais e deverá proceder-se ao cálculo da capacidade resistente da estrutura considerando a perda de resistência devido à deterioração, considerando a carga realmente actuante. A natureza e causa dos defeitos, incluindo combinações de causas, devem ser identificadas e registadas.

O objectivo de recolher estas informações é definir o grau de segurança da estrutura e prever a evolução da deterioração, definindo um período de vida útil remanescente, sendo assim possível estabelecer a urgência da intervenção. Estas informações são também úteis para o engenheiro projectista definir uma estratégia de intervenção.

Por fim, a norma EN1504 apresenta um esquema com as potenciais causas de deterioração das estruturas de betão. No capítulo seguinte desenvolve-se o mecanismo de deterioração e sintomas, de acordo com o esquema e nomenclatura adoptada na norma.

## **9.2.2 - Preparação do Betão Existente**

### **9.2.2.1 - Limpeza do Betão**

O betão existente, sobre o qual se irá realizar a intervenção, deverá ser devidamente limpo para que se cumpram os seguintes requisitos:

- a) A base de aplicação não deverá ter pó, material solto ou qualquer sujidade que contamine o betão ou diminua a aderência entre materiais.
- b) Até que se proceda à intervenção, a superfície limpa deverá ser provisoriamente protegida para evitar contaminações.

O processo utilizado para limpar o betão existente depende do tipo de sujidade em causa. Nos casos em que o betão se encontre sujo com óleo, gorduras ou outros contaminantes semelhantes, a remoção será conseguida com a utilização de detergentes químicos. Em casos extremos de sujidade poder-se-á utilizar quantidades controladas de ácido na superfície para remover sujidades absorvidas pela superfície de betão. Tanto os detergentes como os ácidos deverão ser convenientemente removidos após a sua utilização. Na fase final da preparação, a utilização de jacto de água ou jacto de areia é bastante eficaz na remoção de sujidades, material solto e pó. De acordo com a norma, a água para limpeza deverá ter até 18 MPa de pressão [11].



### 9.2.2.2 - Aderência entre Materiais

O passo que se segue à limpeza do betão é o de garantir uma boa aderência entre o material existente e o material utilizado na intervenção. Uma boa solução é a criação de rugosidade no substrato. O grau de rugosidade criada deverá estar em conformidade com os materiais a utilizar, para que não os prejudique. O método mais popular para criar rugosidade é a utilização de ferramentas mecânicas de impacto, como o martelo de agulhas. Também se poderá utilizar jacto abrasivo, de areia ou limalha de aço, para criar micro rugosidade. Por vezes também é necessário garantir a aderência entre camadas de argamassa de reparação, o que poderá ser conseguido criando irregularidades na camada receptora enquanto esta ainda está fresca.

No entanto, a rugosidade do substrato poderá não ser suficiente para garantir a aderência necessária ou poderá não ser desejável. Nos casos em que a intervenção implique a colocação de uma camada de material fina (inferior a 50mm) dever-se-á utilizar um produto de ligação entre materiais. Estes produtos podem ser, no caso em que o material de reparação é o betão, resinas ou caldas de cimento especialmente preparadas. Estes produtos são denominados de primários.

### 9.2.2.3 - Remoção do Betão Danificado

O betão danificado deverá ser removido, especialmente se se encontrar delaminado ou fendilhado. A remoção do betão deverá ser acompanhada de alguns cuidados, não só porque a segurança da estrutura poderá ser comprometida, mas também porque a remoção de grandes áreas de betão tem um custo significativo no contexto da intervenção. Alguns dos cuidados a considerar nesta operação são [11]:

- a) Remover o mínimo de betão necessário e em concordância com o método escolhido para a intervenção.
- b) A remoção do betão não deverá pôr em causa a segurança da estrutura. Caso isso aconteça, dever-se-á proceder ao seu escoramento.
- c) A profundidade de remoção do betão deverá ser no mínimo igual à profundidade de carbonatação ou penetração dos cloretos, e deverá ser especificada no projecto.

Para além destes aspectos gerais a norma apresenta indicações de ordem prática relativas a este trabalho [11]:

- a) As arestas de corte deverão ter um ângulo com a horizontal compreendido entre 90 e 135°.



b) Caso as armaduras expostas apresentem sinais de corrosão, o betão deve ser removido numa profundidade de 15 mm ou na máxima dimensão dos inertes para além das armaduras.

Caso exista contaminação com cloretos deve ser removido até 20 mm para além das armaduras. Para os lados a distância de remoção deve variar entre 50 e 100 mm.

Existem várias técnicas disponíveis para a remoção de betão. A escolha do método depende da consideração dos seguintes factores: impacto ambiental dos fragmentos retirados, custo, quantidade e qualidade do betão a remover, risco de dano no betão a manter, restrições de ruído e ocupação. As técnicas correntes de remoção são as seguintes:

- a) Remoção por corte – aplicação de forças de corte, habitualmente com garras mecânicas, ou utilização de lança térmica em todo o perímetro de betão a remover.
- b) Remoção por esmagamento – aplicação de forças hidráulicas para esmagar e remover o betão. Este será, talvez, o processo mais corrente, uma vez que a ferramenta, o martelo hidráulico, é de fácil manuseamento e é muito acessível em obra.
- c) Remoção por impacto – impacto cíclico de um peso na superfície do betão.
- d) Remoção por explosão – colocação de material explosivo, de forma controlada, em buracos realizados no betão a remover.
- d) Remoção por indução de fendilhação – colocação de químicos expansivos em buracos realizados no perímetro de betão a remover.
- e) Remoção por abrasão – aplicação de forças abrasivas na superfície do betão para causar o seu desgaste.
- f) Remoção com jacto de água – a utilizar em zonas de betão fragilizado com pressões entre 60 e 110 MPa [11].

### 9.2.3. - Preparação do Aço

Alguns dos métodos referidos de protecção e reparação exigem a limpeza do aço, nomeadamente se este se encontrar corroído. O primeiro passo deste processo é, obviamente, a remoção do betão que envolve os varões. Para tal, um pequeno martelo hidráulico poderá ser utilizado. Esta remoção deverá ser realizada com bastante cuidado e com conhecimento prévio da localização das armaduras para que estas não sejam danificadas.

No processo de limpeza do aço deverão ser cumpridas as seguintes especificações:



- a) A ferrugem e outras sujidades que reduzam a aderência entre o betão e o aço deverão ser retiradas.
- b) Todo o perímetro do varão deverá ser limpo, se tal for possível.
- c) Após a limpeza, o varão deverá ser temporariamente protegido, até que se proceda à intervenção.
- d) A limpeza não deverá prejudicar o varão ou contaminar o betão adjacente e o ambiente.
- e) Nos casos em que o varão se encontre contaminado com cloretos ou outros agentes que originem a sua corrosão, estes deverão ser retirados com jacto de água.

O processo de limpeza utilizado na remoção de ferrugem e outras sujidades depende da área a limpar. Para pequenas extensões, uma limpeza manual com esfregão de aço poderá ser suficiente.

Para grandes extensões, o jacto de areia seco é o método mais eficiente. Também é possível recorrer à utilização de jacto de areia húmida ou jacto de água (com pressões entre 18 e 60 MPa [11]), mas estes fornecem a humidade e oxigénio necessários para se dar a corrosão após a intervenção.

É possível que, no momento de colocação do novo betão, as armaduras já tenham de novo ferrugem no seu perímetro. Neste caso, apenas a ferrugem que se solta com facilidade deverá ser removida imediatamente antes da aplicação. Se a ferrugem estiver firmemente ligada ao varão, ela não será prejudicial e poderá ser mantida.

### 9.3 - Controlo de Qualidade dos Trabalhos

A Parte 8 da norma NP EN 1504 refere-se ao controlo de qualidade e avaliação de conformidade de produtos e sistemas. Nesta parte são apresentadas indicações muito genéricas, tais como a necessidade de realizar ensaios de desempenho para garantir que produtos e sistemas respeitam as especificações apresentadas nas restantes partes da norma. São também apresentadas indicações relativas a equipamento, rotulagem de materiais e fiscalização.

Por outro lado, na Parte 10 da norma, são especificados os ensaios a realizar para garantir a qualidade dos trabalhos. Nomeadamente, de acordo com o método adoptado para a intervenção, indicam-se quais os ensaios e observações a utilizar para avaliar a condição do substrato, a conformidade de produtos a aplicar e o cumprimento de requisitos de qualidade.



A título de exemplo indicam-se alguns aspectos a verificar para aferir a qualidade dos trabalhos: limpeza do substrato, tensão de arrancamento do produto aplicado ao substrato, teor de cloretos, nível de humidade do ambiente, resistência dos materiais aplicados, nível de preenchimento das fendas, aderência das armaduras ao betão, etc. [11].

Os ensaios e observações referidos são apenas referenciados e brevemente explicados, remetendo-se para normas que contêm os procedimentos a adoptar. O objectivo da norma é especificar de forma exaustiva quais os ensaios e observações a realizar, com que periodicidade e de que forma e qual a norma ou procedimento a seguir. De acordo com o método adoptado são indicadas todas as verificações e ensaios a realizar.

Refere-se ainda, embora tal não seja especificado na NP EN1504, que é recomendável a definição de um secção de referência desde o início dos trabalhos. Nesta secção será avaliada a qualidade da aplicação dos sistemas e a conformidade relativa às especificações dos produtos a aplicar.

### **9.3.1 - Colocação de Argamassa ou Micro betão em Zonas de Superfície Deteriorada**

#### **Descrição da técnica**

A deterioração do betão muitas vezes origina a necessidade de se proceder à colocação de argamassa ou micro betão à superfície da estrutura para reposição de betão deteriorado. Este é o caso muito corrente de delaminação devido a corrosão das armaduras, lacunas no betão devido a impactos, erosão devido, etc. As consequências óbvias deste tipo de deterioração, em que existe ausência de betão e exposição das armaduras, é uma progressão mais rápida da corrosão do aço, por este ter fácil acesso a agentes agressivos, e diminuição de resistência mecânica do elemento por perda de secção.

Este tipo de reparação recorre aos mesmos materiais utilizados na técnica de protecção superficial com nova camada de recobrimento, ou seja, argamassa e micro betão. Também neste caso o ligante pode ser mineral ou polimérico.

#### **Argamassa ou micro betão de ligante mineral**

O ligante mais corrente utilizado na concepção das argamassas e micro betões para reparações superficiais é o cimento Portland. A utilização de inertes de pequeno diâmetro (inferior a 7mm) misturados na argamassa origina o micro betão, que se deve utilizar nos casos em que a



profundidade de reparação é muito elevada (superior a 60mm), para controlar fenómenos de retracção.

Tal como se referiu anteriormente, à argamassa ou micro betão pode ser adicionado sílica de fumo para melhorar a resistência e diminuir a vulnerabilidade da solução. Também se referiu que a utilização de polímeros, como o látex, misturados na amassadura, melhora consideravelmente as características do produto.

As argamassas e micro betões fornecidos por fabricantes especializados devem ter aditivos na sua composição para controlo da retracção e melhoria das condições de trabalhabilidade. A retracção de secagem deve ser inferior a 0.05% [12] e a utilização destes produtos deve ser conseguida com baixos rácios água cimento, na ordem dos 0.35, para garantir uma boa resistência e uma baixa porosidade após cura. Podem ser conseguidas misturas de tal modo fluidas que o produto tenha características autonivelantes, para reparações de grandes superfícies horizontais. É também aconselhável a utilização de fibras para aumentar a resistência mecânica e diminuir a fendilhação superficial após cura. As fibras de polipropileno são de utilização corrente nestes casos, mas também se podem utilizar fibras de vidro, aço, etc.

### **Argamassa ou micro betão de ligante polimérico**

Existem argamassas cujo ligante é polimérico, como as argamassas de resina de epóxy ou acrílicas. As resinas devem ser misturados com areia muito fina. Estas argamassas são mais resistentes e menos vulneráveis a ataques de agentes agressivos do que as argamassas de cimento. No entanto são bastante mais caras e apresentam características físicas e químicas diferentes do substrato, o que pode representar alguns problemas no decorrer da utilização da estrutura. Para além disso, as resinas sofrem um envelhecimento rápido quando expostas aos raios UV pelo que a sua utilização no exterior só pode acontecer se se garantir um meio de protecção eficaz.

Às argamassas com ligante orgânico podem ser adicionadas cargas para melhorar o seu comportamento e diminuir a quantidade de resina utilizada. Por exemplo, a utilização de micro esferas de vidro aumenta a densidade da argamassa, a utilização de sílica permite diminuir o preço da solução e as fibras de vidro aumentam a sua resistência mecânica [12]. Neste tipo de argamassa, um aspecto a considerar é o “pot-life” dos materiais, ou seja, o intervalo de tempo em que a argamassa é trabalhável após a sua preparação, antes de começar a endurecer. Do ponto de vista de características mecânicas, deve-se procurar ter uma argamassa com módulo de elasticidade semelhante ao substrato e com tensão de aderência superior à tensão de tracção resistente deste [12].



## Utilização

A escolha do material de reparação, nomeadamente, da sua cor, deve considerar aspectos de ordem estética. Se o material de reparação tiver uma aparência muito diferente da estrutura existente, a reparação vai parecer um conjunto de remendos que confere uma má imagem à estrutura.

Quando se procede a reparações profundas considera-se que a estrutura irá ter um comportamento mecânico semelhante ao que tinha no seu estado original. No entanto, muitas vezes introduzem-se materiais com características distintas do substrato. Materiais com tensões de tracção resistentes ou módulos de elasticidade muito superiores ao do substrato, podem resultar numa distribuição de esforços diferente do esperado, com concentrações na zona reparada. Por outro lado, pode não se conseguir mobilizar o material de reparação, se a secção existente não estiver muito esforçada ou se o material de reparação sofrer muita retracção. A estratégia a adoptar para mobilizar o material é descarregar previamente a estrutura e, eventualmente, escorá-la. Após a reparação, as novas cargas serão resistidas de acordo com a rigidez de cada material. Por esta razão, é preferível especificar materiais com rigidez e resistência semelhantes ao substrato.

Nos casos em que a reparação acontece devido à delaminação do betão por corrosão das armaduras, estas devem ser cuidadosamente inspeccionadas após remoção da ferrugem, para confirmar que não existe perda de secção significativa (a corrosão é um processo que envolve a dissolução do aço). Nos casos em que exista deve proceder-se ao seu reforço por colocação de novos varões. Os varões devem ser colocados com comprimento equivalente à zona que sofreu perda significativa mais o comprimento de emenda para cada lado para garantir um comportamento conjunto com os varões existente. Também podem ser ligados aos varões existentes por soldadura ou acoplação mecânica.

É necessário considerar o risco de corrosão destes novos varões, recorrendo a medidas preventivas com a protecção com revestimento anticorrosivo ou a utilização de aço inox, que é praticamente imune à corrosão.

Um aspecto a considerar quando se procede a reparações superficiais é a formação de ânodos incipientes. Muitas vezes grandes áreas de armadura encontram-se despassivadas, mas apenas algumas se portam como ânodos, por terem mais acesso a oxigénio ou água, por terem reduzido recobrimento, por exemplo. Quando se procede à reparação destas zonas, não prevendo medidas globais de protecção superficial ou tratamento do betão, estas passam a funcionar como cátodos e novos ânodos, antigos cátodos, irão aparecer, comprometendo a durabilidade da reparação.



Relativamente à preparação para a aplicação desta técnica, a norma NP EN 1504 refere que a superfície deve ser limpa e deve ser criada rugosidade após remoção do betão deteriorado. No que toca à sua aplicação refere que se pode aplicar um primário para ligação do produto ao substrato e que, caso isso não aconteça, a superfície deve ser saturada com água, o que deve começar no dia antes da intervenção (se não houver este cuidado, a água da argamassa será absorvida pelo substrato).

Acrescenta-se ao apresentado na norma que a tensão mínima de aderência entre o material de reparação e o substrato após cura deve ser 1.2 MPa ou o substrato deve romper. O processo de reparação pode ser resumido da seguinte forma:

1. Identificação de zonas danificadas.
2. Remoção do betão deteriorado.
3. Limpeza da corrosão de aço e da superfície de betão exposta.
4. Se necessário substituição de varões de aço danificados.
5. Eventual aplicação de produto de prevenção da corrosão.
6. Aplicação de primário ou saturação com água do substrato.
7. Aplicação de argamassa ou micro betão de reparação.

Habitualmente o produto de reparação é colocado directamente na zona deteriorada, à mão. Se a inclinação da superfície o exigir pode-se utilizar cofragem. Um método muito corrente de reparação de grandes áreas é a utilização de betão projectado. A projecção de betão pode ser de dois tipos, seca ou húmida. No primeiro caso, os agregados são misturados com o cimento e injectados sob pressão numa mangueira que humidifica uniformemente a pasta. No segundo caso, a amassadura é feita de forma convencional e depois projectada sobre pressão. Neste último caso, a quantidade de água introduzida na amassadura é perfeitamente definida e a velocidade de produção é maior. No entanto, na projecção seca a aderência ao substrato é superior, pois permite maiores velocidades de projecção. No entanto, a quantidade de água é controlada na extremidade pelo operador que pode aumentar a quantidade de água na mistura para melhorar a trabalhabilidade, resultando em problemas de porosidade e retracção do betão.

A técnica de projecção de betão exige mão-de-obra altamente qualificada uma vez que é o operador que define o andamento da reparação. Os grandes defeitos neste tipo de reparação acontecem quando se recorre a mão-de-obra não qualificada, resultando em espessuras irregulares, pouca aderência ao substrato, vazios entre camadas. Também o betão projectado costuma ter uma maior quantidade de cimento do que as argamassas aplicadas à mão pelo que muitas vezes fendilham



devido à retracção. De acordo com a norma NP EN1504 camadas superiores a 70mm devem ser armadas para diminuir a abertura de fendas [11].

### **Objectivos – Métodos de intervenção em que se aplica esta técnica**

Método 3.1 – Substituição do betão – Aplicação à mão de argamassa

A aplicar em pequenas áreas de reparação.

Método 3.2 – Substituição do betão – Nova betonagem

Para áreas ou profundidades muito elevadas dever-se-á utilizar micro betão.

Método 3.3 – Substituição do betão – Projecção de argamassa ou betão

Para superfícies irregulares, horizontais e de grande extensão a projecção de argamassa ou betão é uma hipótese economicamente viável.

Método 4.4 – Reforço estrutural – Colocação de argamassa à mão

Estruturas com reduzida resistência devido a redução de secção podem reaver a sua resistência inicial após colocação de argamassa ou micro betão nas zonas reparadas.

Método 7.2 – Preservação ou restituição da camada passiva das armaduras – Substituição de betão contaminado ou carbonatado

Nos casos em que a contaminação do betão que envolve as armaduras é irreversível, a sua remoção e substituição poderá ser a solução mais simples de executar.

### **9.4 - Produtos disponíveis no mercado**

No Capítulo 9.4.2, referente à colocação de nova camada de recobrimento – argamassas e micro betão de protecção, referiram-se materiais igualmente indicados para esta técnica de intervenção.

SIKA – Sikalastic 150 – Argamassa reforçada com fibras, à base de cimentos modificados com polímeros especiais resistentes à alcalinidade, com muito baixo módulo de elasticidade. Contém agregados com diâmetro máximo 0.5mm e permite camadas até 2mm. Revestimento impermeável flexível, anticarbonatação, resistente a cloretos e sulfatos.

SIKA – Sika MonoTop 620 – Argamassa constituída por cimento, areias seleccionadas, sílica de fumo e resinas sintéticas. Trata-se de uma argamassa projectável em pequenas espessuras, bastante impermeável e que impede a carbonatação, apresenta baixa retracção e elevada aderência.



BASF – Emaco S88 Fluido – Argamassa com retracção compensada, fluida, resistente aos sulfatos, indicada para elementos estruturais sujeitos a acções elevadas.

BASF – Emaço NanoCrete R4 – Argamassa de reparação estrutural fibro-reforçada, garante elevada resistência estrutural. Apresenta boa resistência à carbonatação e à acção dos sulfatos. Têm a retracção compensada.



## 10 - REABILITAÇÃO DA PONTE CAIS

As técnicas de reparação da estrutura e infra-estrutura da ponte cais são apresentadas no quadro n.º 4 em anexo, onde se representam os diversos tipos de obra de reparação consoante a natureza, extensão e localização da deterioração, aliada ao facto da elevada concentração de cloretos praticamente em todos os troços das estacas.

De referir ainda, que de uma forma geral, nas ligações entre as reparações tipo T2 (cota +4,5 ; +3,0) , tipo T3A (cota +3,0 ; +1,43) , e tipo T3B (cota +1,43 ; +0,50) as estacas que se apresentam com mais do que um troço a reparar (cerca de 198 estacas) são reparadas sem interrupções, ou seja, a reparação é executada num troço contínuo e não em reparações pontuais.

Este tipo de reabilitação não contempla somente a componente principal de repor a integridade estrutural das estacas, mas também proceder à remoção do betão altamente contaminado pela penetração dos cloretos.

Este processo de reabilitação resulta na remoção total do betão longitudinalmente na maioria das estacas em cerca 4,25 m, entre as cotas +4,5 e + 0,5 até à profundidade de cerca de 2 cm no tardo das armaduras existentes. Devido ao recobrimento mínimo das armaduras de 6 cm e à espessura do betão saneado por detrás dos varões das armaduras com cerca de 2 cm, a espessura do novo betão a injectar nos troços das estacas a reparar será cerca de 10,5 cm.

Procede-se em seguida a uma descrição sucinta de cada um desses tipos de intervenção em obra:

### 10.1 - Infra-estrutura

Proceder-se-á à limpeza geral das estacas, a jacto de areia a alta pressão removendo o betão solto e contaminado, e a uma inspecção geral submersa das estacas.

Identificados os tipos de deteriorações e as extensões destas serão no caso, aplicados os tipos de reparação adequados às situações encontradas.

**Os tipos de obras de reabilitação que, com base no conhecimento actual da situação será necessário realizar nas estacas são genericamente, os seguintes:**



a) **Tipo T1 – Construção de Nova Estaca**

Próximo do local da estaca que se encontra fora de serviço será executada uma abertura na laje que permita a execução de uma nova estaca a partir da superfície do tabuleiro do cais conforme mostra a fig.11.

Atendendo ao estado da estrutura, deverá ser evitada a cravação das estacas por apiloamento e serem utilizadas estacas de betão armado moldado “in situ” após a perfuração com entubadura.

As novas estacas ficarão com camisa metálica perdida que servirá de molde na extensão necessária.

No topo da estaca será executado um maciço de encabeçamento para a necessária solidarização ao vigamento principal e à laje do tabuleiro.

De acordo com o levantamento efectuado o número estimado de novas estacas a construir é de 28 unidades.

É de assinalar que antes da realização dos trabalhos de recuperação das infra-estruturas da ponte cais será necessário proceder-se à dragagem dos lodos que se encontram acima do perfil teórico do talude, visto ser possível que algumas das estacas se encontrem deterioradas abaixo do talude actual.

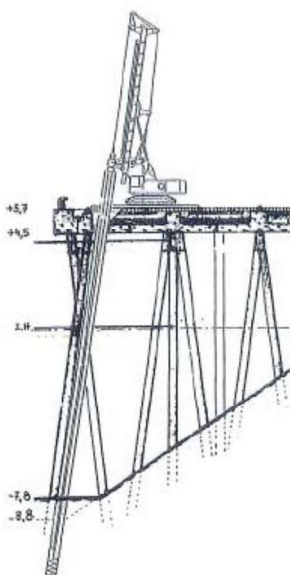


Fig. 11



**b) Tipo T2 – Reparação da estaca acima da cota + 3,0 m. (PMAM)**

De acordo com o quadro I, o número estimado de estacas deterioradas acima da cota + 3,0 m (ZH) é de 319 unidades e a estimativa do comprimento médio a reparar é de 1,0 m.

O tipo de reparação que se preconiza para a reparação das cabeças das estacas é constituído pela seguinte sequência de operações:

- (i) Demolição e limpeza complementar de toda a zona deteriorada a jacto de água, removendo todo o betão solto ou contaminado, e a oxidação das armaduras;
- (ii) Colocação das armaduras complementares e de reforço
- (iii) Saturação do substrato com água doce.
- (iv) Projecção de argamassa de cimento, de tal forma que o recobrimento final das armaduras seja igual ou superior a 6 cm.

A utilização de argamassa projectada é a técnica que está indicada para reparar a superfície inferior da laje e julga-se que na reparação das cabeças das estacas a mesma técnica é, também, a mais indicada. Com efeito, a execução de betonagem após a colocação de cofragem recuperável ou perdida, oferece dificuldade, principalmente no caso das estacas tangente.

**c) T3 – Reparação de estacas abaixo da cota + 3,0 m. (PMAM).**

De acordo com o quadro I, os valores estimados das quantidades de estacas e dos comprimentos médios a reparar são os seguintes :

	Quantidade	Comprimt. Médio (cm)
<b><u>T3A – acima da cota + 1,5 m. (entre BMAM PMAM)</u></b>	163	160
<b><u>T3B – entre + 1,5 m. e o ZH (entre BMAM e o ZH)</u></b>	32	165
<b><u>T3C – abaixo do ZH</u></b>	15	230

O tipo de reparação que se preconiza é constituído pela seguinte sequência de operações



- (i) Demolição e limpeza complementar de toda a zona deteriorada a jacto de água, removendo todo o betão solto ou contaminado, e a oxidação das armaduras, e inspecção complementar.
- (ii) Colocação das armaduras complementares e de reforço.
- (iii) Saturação do substrato com água doce.
- (iv) Colocação de cofragem recuperável, ou perdida
- (v) Enchimento com micro betão injectado
- (vi) Recuperação de cofragem se for caso disso.

Admite-se que os trabalhos possam ser realizados pelo processo construtivo seguinte:

- Com um equipamento especialmente concebido para manobrar convenientemente nos espaços exíguos disponíveis e adaptar-se a diferentes inclinações das estacas e alturas dos troços a reparar nas operações de colocação e de recuperação das cofragens. Este trabalho deverá ser apoiado em determinadas ocasiões por uma equipa de mergulhadores (reparações T3 C – abaixo do ZH).

Após o encamisamento das estacas, e recorrendo a um tanque de água doce dá-se início à injeção da água através dos tubos de injeção do micro betão saturando com água doce o substrato e expelindo resíduos de água salgada existentes, por força da contaminação das águas das marés.

A reparação com a injeção de micro betão (autocompactável) inicia-se com a injeção de argamassas devidamente doseadas e activadas de forma a preencher o volume dos vazios. Esta injeção é executada através de uma rede de tubos e válvulas previamente colocados na cofragem. Estas argamassas de injeção são fabricadas em misturadores apropriados, com os quais, deve haver o mesmo tipo de cuidados de limpeza usuais nas betoneiras normais. As dosagens pré-estabelecidas devem poder ser controladas por processos volumétricos ou ponderais adequados. Na mistura dos componentes da calda de injeção é fundamental seguir a seguinte ordem : água, redutor de ar, cimento e areia. A injeção das argamassas é efectuada através dos já referidos tubos de injeção e processa-se de baixo para cima a partir do ponto mais baixo até à superfície, esta operação é continua e só terminará quando todo o ar ou água for expulso através dos tubos de respiro, ou através da superfície livre de betonagem. No caso específico das reparações das estacas abaixo do Z.H. (T3 C) ou seja abaixo da linha de água. Na parte superior da cofragem serão montados novos tubos de injeção e correspondente selagem da face superior desta de modo a selar



todo o troço de estaca a reabilitar. O método de injeção será idêntico aos anteriores sendo o equilíbrio e a continuidade da entrada de micro betão compensada pela expulsão da água doce contida no interior da cofragem. Esta operação é efectuada recorrendo a bombas e tanques de equilíbrio.

A cura requerida para estes betões injectados é idêntica à necessária para grandes massas de betão normal.

A injeção de micro betão com a pré-colocação de inertes grossos poderá ser utilizada quando a dimensão da estaca a reparar se apresentar bastante reduzida ou mesmo inexistente é executada em duas fases. Na primeira fase procede-se à colocação cuidadosa do inerte grosso de forma a evitar esmagamentos, devidamente calibrado e lavado de forma a eliminar todos os finos em toda a zona a betonar, estes cuidados visam eliminar a hipótese de bloqueio dos canais de circulação da calda, permitindo assim um fácil envolvimento de todo o agregado pela calda de injeção. Por sua vez a colocação adequada do inerte grosso com recurso até a uma ligeira vibração, anula a retracção e permite que a injeção se processe em perfeitas condições.

Na segunda fase procede-se à injeção de argamassas devidamente doseadas e activadas de forma a preencher o volume dos vazios do inerte anteriormente colocado. Esta injeção é executada através de uma rede de tubos e válvulas previamente colocados na cofragem.

Estas argamassas de injeção são fabricadas em misturadores apropriados, com os quais, deve haver o mesmo tipo de cuidados de limpeza usuais nas betoneiras normais. As dosagens pré-estabelecidas devem poder ser controladas por processos volumétricos ou ponderais adequados. Na mistura dos componentes da calda de injeção é fundamental seguir a seguinte ordem : água, redutor de ar, cimento e areia. A injeção das argamassas é efectuada através dos já referidos tubos de injeção e processa-se de baixo para cima a partir do ponto mais baixo até à superfície, esta operação é continua e só terminará quando todo o ar ou água for expulso através dos tubos de respiro, ou através da superfície livre de betonagem. A cura requerida para estes betões injectados é idêntica à necessária para grandes massas de betão normal.

Para a composição do betão autocompactável a utilizar de acordo com a norma EN 206 – 1 definiram-se as seguintes características :

- Classe de resistência mínima..... C35/45
- Quantidade de cimento .....  $300 < c < 400 \text{ kg/m}^3$
- Relação água cimento.....  $a/c < 0.4$



- Máximo diâmetro de inerte..... inerte < 10 mm
- Desempenho :
  - Permeabilidade à água .....D < 1 x 10<sup>-12</sup> m/s (ISO 7 031)
  - Penetração de cloretos.....D < 1 x 10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/s (Tang Luping)
  - Porosidade.....< 14 % (LNEC e 393)
  - Aderência ao betão antigo fb ..... > 1MPa (28 dias)

O betão adoptado teria a seguinte composição:

- Cimento tipo II / A-L 42.5 R com 355 kg/m<sup>3</sup>, 177 kg/m<sup>3</sup> de cinzas volantes, 195 kg/m<sup>3</sup> de escórias, relação água cimento a/c=0.27.

Do controlo de qualidade verificaram-se os requisitos exigidos, por exemplo:

- Resistência física do betão aos 28 dias de 71 a 97 MPa, penetração média da água de 7 mm.

## 10.2 - Super-estrutura

### a) – T4 – Reparação da superfície inferior das lajes e vigas

Conforme indicado no quadro II as quantidades estimadas de reparação são as seguintes:

- 66,0 m<sup>2</sup> da superfície inferior da laje das galerias 1 a 4, encontrando-se com armaduras à vista, ou com betão de recobrimento já solto;
- 207,0 ml das juntas de dilatação e/ou betonagem encontram-se deterioradas, com armadura à vista ou com betão de recobrimento já solto;
- 83,6 ml da bordadura da laje na frente marítima encontra-se no mesmo estado

O tipo de reparação que se preconiza é constituído pela seguinte sequência de operações :



- (i) – Demolição e limpeza complementar de todas as áreas deterioradas, a jacto de água e/ou areia, removendo todo o betão solto ou contaminado e a oxidação das armaduras, e inspeção complementar.
- (ii) – Colocação das armaduras complementares e de reforço.
- (iii) – Saturação do substrato com água doce.
- (iv) – Projecção de argamassa de cimento, de tal forma que o recobrimento final das armaduras seja igual ou superior a 6 cm. Nas juntas de dilatação e nas arestas de bordadura das lajes poderão ser utilizadas argamassas de resina de epóxy ou acrílicas dado a sua geometria e baixa espessura de aplicação

**b) - Tipo T5 – Demolição e Reconstrução da Laje de Transição (Galeria 5)**

Através do quadro II poderá ser observado que enquanto no Módulo III, cerca de metade da laje de transição se encontra em bom estado visual, nos módulos I e II, a extensão com armaduras à vista corroídas, ou com o betão de recobrimento já solto, atingiu 93,5 e 76,5% das extensões totais respectivas, representando uma área total de 780 m<sup>2</sup>.

Tratando-se de lajes simplesmente apoiadas, a reabilitação, com a substituição das armaduras principais da face inferior, afigura-se ser um trabalho bastante oneroso e que será preferível proceder-se à demolição das zonas em mau estado e à reconstrução da laje.

O tipo de reconstrução preconizado consiste na pré-fabricação de lajes com 15 a 20 cm. de espessura (pré-lajes), que serão colocadas justapostas vencendo o vão entre a crista do talude e a primeira viga longitudinal do tabuleiro da ponte-cais do lado de terra e que servirão de cofragem para a betonagem da espessura da laje.



### 10.3 - Nota final

No decorrer da elaboração do presente projecto foram ainda equacionadas os “Métodos para satisfazer o Princípio 7 – Preservação ou Restauração da Passividade” conforme a norma NP EN 1504 – 10, a qual inúmera os métodos que satisfazem o princípio de criar condições químicas para que a superfície das armaduras ou seja mantida ou volte ao estado de condição passiva.

Uma estratégia de gestão de estruturas não é escolhida unicamente por razões técnicas, mas também é função de factores económicos, funcionais e ambientais e de outros parâmetros e, mais importante, considerando os requisitos do proprietário relativos à estrutura [11].

O betão enfraquecido, danificado e deteriorado e, onde necessário, o betão são, deve ser removido de acordo com o princípio e o método escolhido de entre os da NP EN 1504 - 9. Betão microfissurado ou delaminado, mesmo quando provocado pelas técnicas de limpeza, desbaste ou remoção, que reduza a ligação ou a integridade estrutural, deve ser subsequentemente removido ou consolidado [11].

Também de acordo com a referida norma no artigo 7.2 – “Preservação ou Restituição da Camada Passiva das Armaduras – Substituição de Betão Contaminado ou Carbonatado” determina que nos casos em que a contaminação do betão que envolve as armaduras é irreversível, a sua remoção e substituição poderá ser a solução mais simples de executar.

As técnicas mais utilizadas para a reabilitação de estruturas deterioradas em que a corrosão é causada pelo elevado teor de cloretos junto às armaduras, são a reparação convencional e a extracção de cloretos. A reparação convencional é o método mais utilizado em todo o mundo e envolve a remoção mecânica do betão seguido da sua substituição por material novo. A reparação é normalmente localizada e envolve somente as zonas visivelmente deterioradas. Contudo a corrosão propaga-se às zonas adjacentes, não reparadas mas também contaminadas por cloretos, dando assim continuidade ao processo de deterioração. Estas novas áreas de corrosão, formadas nas regiões adjacentes às zonas reparadas, são designadas por ânodos incipientes. Para que a reparação convencional tenha uma longa durabilidade é necessário remover todo o betão contaminado, de modo a evitar a formação dos novos ânodos, e substituir por betões ou argamassas de qualidade adequada ao ambiente da estrutura [14].



Existem processos electroquímicos testados que permitem restituir a camada passiva às armaduras. Esses processos consistem na realcanização do betão ou na extracção dos cloretos, conforme a causa de deterioração seja a carbonatação ou o excesso de cloretos, respectivamente.

No caso do presente projecto dado o elevado teor em cloretos apresentado existe a possibilidade de extrair cloretos do interior do betão recorrendo a processo semelhante à realcanização, consistindo na colocação de um ânodo exterior, ligado aos varões de aço que passam a funcionar como cátodo. O ânodo poderá ser uma rede de titânio, embebida num electrólito (que pode ser simplesmente água corrente). O sistema é ligado a uma fonte de alimentação externa de 1 a 2 A/m<sup>2</sup>, que garante a diferença de potencial necessária. Os iões de cloreto por serem negativos migram em direcção ao eléctrodo positivo; o ânodo exterior. Desta forma os cloretos saem do interior do elemento. Este tratamento dura entre 6 a 10 semanas, até que se atinja o valor de teor de cloretos desejados.

Em alternativa ao processo de protecção catódica por ânodos de corrente induzida também foram desenvolvidos sistemas de “Ânodos de Sacrifício” que consistem num pequeno ânodo de sacrificio formado por uma liga anódica galvânica envolvida numa matriz cimentícia activada. Esta “pastilha” é instalada em obras novas ou de recuperação estrutural motivadas por corrosão, bastando amarra-la através de arames de fixação às armaduras da estrutura. Uma vez instalada, a corrente eléctrica que promove o processo de corrosão das armaduras, será naturalmente interrompida e substituída pela corrente gerada pelo metal anódico da “pastilha” através da sua massa iónica em direcção ao aço da armadura, retornando pelo arame de fixação. Desta forma o aço para de corroer e o metal anódico sacrifica-se, corroendo, já que é mais electronegativo

Uma limitada capacidade de corrente eléctrica e de polarização, aliada a baixa condutividade do betão, traduzem-se numa área de actuação limitada destes ânodos de sacrificio. Estes factos resultam na decrescente utilização desta técnica de protecção, tendo em Portugal sido executado um teste piloto em 2006 (pórtico em betão armado nos estaleiros da Lisnave em Setúbal) sem resultados aparentes, nunca tendo sido aplicada esta técnica de “ânodos de sacrificio” em estruturas de betão armado no nosso país.

Aliado ao baixo desempenho deste método, teve também como condição limitadora a utilização deste processo o seu custo acrescido para o Dono da Obra, já que seriam necessários cerca de 6.680 un. só para a zona emersa das 409 estacas. O cálculo do número de ânodos de sacrificio está ligado à área da superfície do betão com a área de aço correspondente, e pode ser determinado pela seguinte fórmula [15] :



$$R_{XP} = \sqrt{\frac{A_c}{10.A_s}}$$

$R_{xp}$  – Raio de cobertura de uma unidade de ânodo de sacrifício tipo “Galvashield XP”

$A_s$  - Área superficial de aço por metro linear de elemento

$A_c$  - Área superficial de betão por metro linear de elemento

Pode-se calcular o consumo e definir o espaçamento das unidades de acordo com o equacionamento disposto a seguir. Este cálculo pode ser realizado para todo tipo de elemento estrutural de betão armado, como pilares, vigas, lajes, paredes de betão, dentre outros. As equações originais para o espaçamento das unidades são derivadas da definição da densidade de corrente eléctrica por metro quadrado de área de superfície de aço, isto é, a corrosão das armaduras é controlada pela aplicação de uma corrente eléctrica externa. O valor da corrente externa requerida depende da superfície de aço a ser protegida, porque é aí que a corrosão se desenvolve. Para obter a quantidade de corrente eléctrica requerida é necessário saber quanto aço está disponível para o processo. Este valor está associado e é medido pela área da superfície de aço. Com o desenvolvimento de uma série de ensaios de laboratório e de campo foi definida a corrente eléctrica transferida para a unidade de “Galvashield XP” e, portanto, foi estabelecido o valor da área de aço correspondente que será protegida por uma unidade. Cada pastilha protege uma área superficial de aço de  $0,26 \text{ m}^2$ . Este valor é a referência principal para o cálculo do consumo e deve ser associado ao raio de protecção para definir o espaçamento entre as unidades de controle da corrosão. Desta forma, o número de pastilhas “Galvashield XP” pode ser determinado em função da taxa de armadura do elemento estrutural, conforme a seguinte equação [15].:

$$C_{XP} = \frac{A_s}{0,26}$$

$C_{xp}$  - Consumo de unidades de Galvashield XP;

$A_s$  - Área superficial de aço por metro linear do elemento.



A equação seguinte pode ser utilizada para calcular a variação do poder de cobertura de cada unidade de “Galvashield XP” em função das diferentes relações superfície de aço/superfície de betão, considerando todas as outras variáveis constantes [15]

$$R_{XP} = \sqrt{\frac{A_c}{10.A_s}}$$

$R_{XP}$  - Raio de cobertura de uma unidade de Galvashield XP;

$A_s$  - Área superficial de aço por metro linear do elemento;

$A_c$  - Área superficial de betão por metro linear do elemento.

$A_s/A_c$  - Relação entre as áreas superficiais de aço e betão por metro linear.

As medidas da superfície de aço e de betão devem ser calculadas por metro linear do elemento. A superfície de aço não é taxa de armadura relacionada à secção de aço, mas sim a área superficial dos varões principais somadas às dos estribos existentes num metro linear do elemento. Em relação ao betão, a superfície a ser considerada é a área total de todas as faces somadas. Esta relação de superfícies apresenta uma correlação directa com o raio de influência ou de cobertura da protecção das unidades instaladas num determinado elemento estrutural. Esta cobertura deve ser entendida como a protecção fornecida às armaduras devido à introdução do zinco no processo electroquímico da corrosão metálica. Isto ocorre porque o zinco apresenta electronegatividade superior ao aço, oxidando primeiro [15].

A Tabela abaixo apresenta o cálculo conduzido para os níveis de cobertura de cada unidade de “Galvashield XP” [15].

$A_s/A_c$	$R_{XP}$ (mm)
0,2	710
0,4	500
0,6	410
0,8	350
1	320



Considerando o raio de cobertura, teoricamente poder-se-ia calcular o espaçamento entre pastilhas ou unidades multiplicando o raio por dois, ou seja, as extremidades dos raios de protecção poderiam ficar no limite de distância. No entanto, este espaçamento deve ser calculado considerando uma vez e meia o raio de protecção. Isto ocorre porque é importante manter uma sobreposição do raio de protecção, pois nas extremidades a influência da pastilha pode perder rendimento devido à distribuição do aço no elemento estrutural, que na verdade é tridimensional. Devido ao contacto entre a armadura principal e os estribos, este circuito fechado possibilita a protecção das armaduras de todo elemento, desde que a corrente possa fluir entre as barras de aço mais distantes. Desta forma, para garantir a protecção do elemento todo, deve-se determinar o espaçamento entre as unidades de “Galvashield XP” conforme a equação [15]:

$$S_{XP} = 1,5.R_{XP}$$

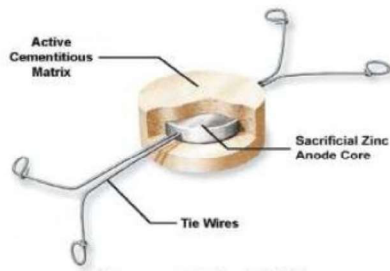
$S_{XP}$  - Espaçamento entre unidades de Galvashield XP;

$R_{XP}$  - Raio de cobertura de uma unidade de Galvashield XP.

Além disso, considerar uma limitação máxima da distância entre as pastilhas, que deve ser de 750 mm para elementos com grande área plana, como lajes, paredes diafragma, pilares-parede, entre outros, e de 600 mm para elementos como vigas, pilares e pilaretes. [15].

Em média, nas estacas da Ponte Cais este valor corresponde a 3,2 un/m<sup>2</sup>, ou seja, uma área de influência de 14,4 cm em Ø de influência do ânodo de sacrifício com um raio de cobertura ( $R_{xp}$ ) de 500 mm de uma unidade e um espaçamento ( $S_{xp}$ ) entre unidades de 580 mm.

O “Galvashield XP” é uma unidade de protecção catódica galvânica constituída por um ânodo de sacrifício de zinco puro, encapsulado num material alcalino de elevada condutividade eléctrica, com fios condutivos para a fixação e contacto com as armaduras da estrutura de betão armado.



Ânodo de Sacrifício tipo "Galvashield XP" da Fosroc [15]

No entanto, qualquer destes tratamentos de protecção catódica deverá ser sempre antecedido do tratamento do betão deteriorado.



## 11- CONCLUSÕES

A necessidade de promover a manutenção e reabilitação de obras de betão armado relaciona-se também com a necessidade de salvaguardar a segurança dos utilizadores. Uma estrutura de betão armado hoje em dia dificilmente colapsa devido a erros de projecto ou de construção, devido à sua enorme redundância e aos factores de segurança utilizados. Por outro lado, problemas graves de deterioração podem levar ao colapso das estruturas, tal como se evidenciou na obra projectada. Há que procurar os sinais que evidenciem problemas de durabilidade e intervir de imediato no sentido de os resolver.

De acordo com a metodologia seguida na elaboração das soluções de reabilitação das estruturas do presente projecto ficou evidente que um aumento da espessura média do recobrimento pode ser bastante benéfico do ponto de vista económico uma vez que, este aumento não encarece muito o custo de reabilitação e acaba por ter uma grande influência no custo final dos trabalhos de reabilitação das estruturas da ponte cais, já que a penetração dos cloretos demorarão mais tempo a chegar às armaduras e o número de reparações a efectuar durante a vida útil da estrutura será bastante inferior. Esta redução do número necessário de reparações está directamente ligado com a melhor qualidade do betão uma vez que, num betão aplicado de má qualidade, o aumento do recobrimento não dificulta a penetração dos cloretos.

As operações de manutenção devem prever a implementação de sistemas de protecção que permitam assegurar e até prolongar a vida útil das estruturas, evitando chegar ao ponto em que se torna necessário a sua demolição. Não há, portanto, razões para a reabilitação de estruturas não ser equacionada antes da eventual demolição de uma estrutura de betão armado deteriorada.

Em resumo, este projecto demonstra a importância da aplicação das Normas Nacionais existentes no projecto de reabilitação de estruturas em betão armado. No caso das estruturas da ponte cais, a prática corrente em engenharia, mostra que o dono de obra deveria efectuar com alguma periodicidade a inspecção e ensaios ao longo do tempo de modo a conhecer o estado de degradação existente nas estruturas.



## 12- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Lança, P - “Conservação e Reabilitação de Construções”, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Beja, disponível em: [http://www.estig.ipbeja.pt/~pdnl/Sub-paginas/Conservacao de edificios\\_files/Documentos/Aulas/BA/BA](http://www.estig.ipbeja.pt/~pdnl/Sub-paginas/Conservacao%20de%20edificios_files/Documentos/Aulas/BA/BA).
- [2] Ribeiro, F - “Tecnologia do concreto”, CEULP/ULBRA Curso de especialização em tecnologia e gerenciamento de obras, disponível na Internet
- [3] FERREIRA, Rui Miguel; “*Avaliação de ensaios de durabilidade do betão*”; Tese de Mestrado; Escola de Engenharia da Universidade do Minho; 2000.
- [4] COSTA, António; “*Durabilidade de estruturas de betão armado em ambiente marítimo*”; Tese de Doutoramento; Instituto Superior Técnico; 1997
- [5] Folhas da Cadeira de Betão I; IST; 2006/2007
- [6] COSTA, António, “*Degradação de estruturas de betão armado e pré-esforçado por corrosão de armaduras*”; Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas (REPAR2000); Lisboa; 2000.
- [7] FERREIRA, Rui Miguel; “*Avaliação de ensaios de durabilidade do betão*”; Tese de Mestrado; Escola de Engenharia da Universidade do Minho; 2000.
- [8] D.W. Bildereek et all; “*Durability of Structures in Marine Environment Recent Dutch Research*”; PIANC, Bruxelas; 1985
- [9] R. D. Brown et all; “*Deterioration of Concrete Structures Under Marine Conditions and Their Inspection and Repair*”; Maintenance of Maritime Structures; Londres 1978
- [10] Farinha, Brasão et all; “*Manual de Estaleiros de Construção de Edifícios*”; LNEC; 1996.
- [11] “*Norma Portuguesa NP EN 1504. Produtos e Sistemas para a Protecção e Reparação de Estruturas de Betão. Definições, requisitos, controlo de qualidade e avaliação de conformidade*”; Instituto Português da Qualidade; Portugal; 2006.
- [12] RIBEIRO, Maria Sofia; “*Argamassas de Reparação de Betão Estrutural. Curso de Durabilidade, Reparação e Reforço de Estruturas de Betão*”; Portugal 1997.
- [13] “*Repairing Concrete Structures – Technical specifications*”; Association of Consulting Engineers, Norway; 1995.
- [14] LOURENÇO, Zita - “*Protecção Catódica de Estruturas de Betão Armado*” Corros. Prot. Mater., Vol. 26 - Nº 3 (2007)
- [15] Fosroc Limited, UK – “*Galvashield XP – Boletim Técnico*”; Revisão Janeiro 2005



### 13 - BIBLIOGRAFIA CONSULTADA MAS NÃO REFERENCIADA NO TEXTO

[16] FARINHA, Manuel Brazão; *“Reabilitação e manutenção de edifícios”*; 2006.

[17] CATARINO, José M.; *“Novos materiais estruturais”*; Congresso Nacional de Engenharia de Estruturas; Lisboa; 2002.

[18] COSTA, António, *“Degradação de estruturas de betão armado e pré-esforçado por corrosão de armaduras”*; Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas (REPAR2000); Lisboa; 2000.

[19] Especificação LNEC E464-2005.

[20] Especificação LNEC E465-2005.

[21] Norma Portuguesa EN 206-1; 2005 – “Betão – Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade”, Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

[22] ANDRADE, Jairo José de Oliveira; *“Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: Iniciação por cloretos”*; Tese de Doutoramento, Porto Alegre; Brasil; 2001



## **ANEXOS**

- Anexo I - Mapa Resumo Observação Estacas
- Anexo II - Mapa Resumo Observação Laje
- Anexo III - Quadro Resultado dos Ensaios Estacas
- Anexo IV - Quadro Resultado dos Ensaios Laje
- Anexo V - Quantidades Estimadas de reparação Estacas
- Anexo VI - Quantidades Estimadas de reparação Plataforma
- Anexo VII - Mapa de Medições
- Anexo VIII - Estimativa de Custo da Obra



**I - Mapa Resumo Observação Estacas**



## QUADRO I

### ESTACAS

#### MAPA RESUMO das OBSERVAÇÕES

TIPOS de DETRIOÇÃO	1 Estacas fora de Serviço				2 Deterioração Acima + 3,0 m.				3 Deterioração Acima + 1,5 m.				4 Deterioração Entre + 1,50 m e Z. H.				5 Deterioração Abaixo do Z. H.				6 Sem Deterioração				
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	
A	1	1	2	-	5	10	9	2	5	3	6	2	1	1	-	-	1	-	-	-	3	1	-	-	
B	-	-	-	-	8	6	11	3	10	4	6	2	-	-	1	-	-	-	1	-	1	3	1	-	
C	-	-	-	-	8	8	10	2	7	1	2	2	3	2	2	-	2	-	-	-	2	1	1	-	
D	-	-	-	-	8	10	10	1	1	5	1	1	-	-	-	-	1	1	-	-	3	1	1	-	
E	-	-	-	-	9	9	10	1	9	4	4	1	1	2	2	-	-	-	-	-	-	1	1	1	
F	1	-	-	-	1	2	2	-	1	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
G	-	-	-	-	19	20	23	5	8	8	6	5	2	2	2	-	-	3	1	-	2	3	1	-	
H	1	-	-	-	1	1	2	-	1	1	1	-	1	1	1	-	-	-	1	-	-	1	-	-	
I	-	1	-	-	8	14	22	3	9	5	9	-	2	3	3	-	-	-	-	-	9	6	-	-	
J	-	-	-	-	20	19	17	-	17	8	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	1	4	-	
Quantidade	3	2	2	-	87	99	116	17	68	41	41	13	10	11	11	-	4	4	3	-	22	18	9	1	
TOTAIS	7				319				163				32				11				50				
Comprimentos Médios das Estacas com Deterioração ( cms)					50	49	48	46	85	95	90	120	100	120	90	-	100	150	240	-	-	-	-	-	-
					48,7				91,6				103,4				163,3								



## **II - Mapa Resumo Observação Laje**



## QUADRO II

### LAJE

#### Mapa Resumo das Observações

GALERIAS	1				2				3				4				1 a 4	5		
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV		Totais	I	II
1 - Área com armadura à vista (m2)	3,8	2,8	3,9		3,0	2,3	2,8	0,1	0,8		0,5		0,7	0,2	3,0		23,9	-	-	-
2 - Área com betão solto (m2)	3,6	2,4	1,6	0,5	1,6	1,8	1,1	0,1	2,2	5,2	1,9	-	3,5	4,4	1,5	-	31,0	-	-	-
3 - Juntas deterioradas		12,7		5,0	-	11,0	4,5	-	16,5	23,5	7,0	-	24,7	38,0	22,7	-	165,6	-	-	-
4 - Bordo da laje partido	26,8	30,4	21,0	5,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	83,6	-	-	-
5 - Bordo da laje fissurado	26,4	13,2	12,0	3,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	55,3	-	-	-
6 - Extensão da laje c/armadura à vista (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	58,3	15,0	26,0
7 - Extensão laje fissurada/betão solto(%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	35,2	61,5	20,0
8 - Extensão de laje deteriorada total (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	93,5	76,5	46,0



### **III - Quadro Resultado dos Ensaios Estacas**



## QUADRO III

### ESTACAS

#### RESULTADO DOS ENSAIOS

ESTACA			TEOR de CLORETOS					TEOR de SULFATOS					TEOR de CIMENTO		CARBONATAÇÃO				
MODULO	FILA	N.º	Cota Estado	PROFUNDIDADE (cm)				Cota Estado	PROFUNDIDADE (cm)				Cota Estado	%	Cota Estado	cm.			
				2	3	4	5		2	3	4	5							
I	A	17	+ 3.30	B	0.68		0.40	+ 3.30	B	0.54		0.33	+ 2.10	m	13.3	+ 3.30	B	0.40	
	C	18	+ 2.10	M	0.84		0.57												
	E	10	+ 3.50	m	0.69	0.74	0.92												
			+ 2.60	m	0.56	.57	0.52	0,59	+ 2.60	m	0.83	0.34	0.80						
	E	24	+ 3.40	M	1.03		0.78		+ 3.30	M	1.13		0.69				+ 3.30	M	0.60
	I	6	+ 3.40	M	0.40	1.10	0.62		+ 2.30	M	0.58	0.48		0.40	+ 2.30	M	24.8	+ 3.30	M
								+ 2.20	M		0.69	0.67	0.29						
II	A	12	+ 3.25	M	0.60		0.54	+ 3.20	M	0.42		0.34	+ 2.85	B	12.8	+ 2.85	B	0.8	
	C	3	+ 2.85	B	0.45		0.27	+ 2.75	B	0.26		0.24							
		21	+ 1.50	M	0.54		0.74						+ 1.50	M	15.1				
	D	2	+ 2.70	m	1.08		0.50	+ 2.65	m	0.64		0.55	+ 2.70	m	12.8	+ 2.70	m	0.80	
		20	+ 3.00	M	0.74		0.89	+ 1.50	M	0.58		0.40	+ 1.50	M	15.1				
	E	9	+ 1.50	M	0.73		0.63	+ 2.90	M	1.19		0.53				+ 3.00	M	0.60	
	F	13						+ 2.60	m		0.63	0.70				+ 2.60	m	0.60	
	G	12	+ 3.80	m	0.94		0.85	+ 2.65	M	0.56		0.65							
	H	13	+ 3.55	m	0.51		0.59	+ 3.40	m	0.51		0.47							
I	3	+ 2.85	m	0.84		0.52													
III	G	3	+ 2.40	B	1.10	0.77		+ 2.40	B	0.68		0.32							
		4	+ 2.90	M		0.85	0.82	+ 2.30	M		1.60	0.72				+ 2.30	M	0.60	
		10	+ 3.10	m	0.87	0.93	0.76	+ 3.10	m		0.42	0.38	0.61			+ 3.10	m	0.50	
		11						+ 3.50	M		0.93	0.45	1.30						
	I	2						+ 2.80	M	0.57		0.38							

#### LEGENDA

Aspecto da superfície:

B - Bom

M - Mau

m - Médio

#### Notas

(1) - % de Cloreto em relação à massa de betão (ensaio laboratorial)

(2) - % de Sulfatos em relação à massa de betão (ensaio laboratorial)

(3) - % de Cimento em relação à massa de betão (ensaio laboratorial)

(4) - Penetração da Carbonatação em relação à superfície (ensaio "In Situ")



#### **IV - Quadro Resultado dos Ensaios Laje**



## QUADRO I V

### LAJE

#### Resumo dos Ensaios

LOCALIZAÇÃO	ESTADO	TEOR de CLORETOS (1)		TEOR de SULFATOS (2)	
		1,0 a 2,5 cm	0,48	1,0 a 2,0 cm.	0,44
Junto à estaca I 6 do Módulo I	Bom	2,5 a 4,0 cm	0,47	2,0 a 4,0 cm.	0,26
		1,0 a 2,0 cm	0,50	1,0 a 2,5 cm.	0,54
Junto à estaca E 10 do Módulo I	Mau	2,0 a 4,0cm.	0,49	2,0 a 4,0 cm.	0,25

Notas :

Estado : Aspecto da superfície

(1) - % de cloretos em relação à massa de betão

(2) - % de sulfatos em relação à massa de betão



## **V - Quantidades Estimadas de reparação Estacas**



## QUADRO V

### ESTACAS

#### Quantidades Estimadas de Reparações

Tipos de Reparações	Estacas a Reparar (un)						Comprimentos de Reparação (m)					
	Quant. Observada			Quant. Estimada			Médios			Totais		
	Ø 32	Ø 40	Total	Ø 32	Ø 40	Total	Ø 32	Ø 40	Total	Ø 32	Ø 40	Total
<b>T1</b> - Construção de novas estacas	1,0	6,0	7,0	5,0	10,0	15,0	9,0	14,0	—	54,0	210,0	264,0
<b>T2</b> - Reparação acima da cota + 3,00 m (P.M.A.M.)	103,0	216,0	319,0	105,0	225,0	330,0	-	-	1,00	105,0	225,0	330,0
<b>T3A</b> - Reparação acima da cota + 1,50 m. (entre B.M.A. M. e P.M.A.M.)	55,0	108,0	163,0	60,0	115,0	175,0	-	-	1,60	88,0	280,0	348,0
<b>T3B</b> - Reparação entre a cota + 1,50 m. e o Z.H. (entre B.M.A.M. e Z.H..)	7,0	25,0	32,0	10,0	30,0	40,0	-	-	1,65	49,5	66,0	115,5
<b>T3C</b> - Reparação abaixo do Z.H.	-	11,0	15,0	5,0	20,0	25,0	-	-	2,30	11,5	46,0	57,5



## **VI - Quantidades Estimadas de reparação laje**



## QUADRO VI

### PLATAFORMA

#### Quantidades Estimadas de Reparações

Tipos de Deteriorações Observadas	Galerias					Totais	Tipos de Reparação	Quant. Estimada
	1	2	3	4	5			
Área com armadura à vista (m <sup>2</sup> )	10,5	8,2	1,3	1,2	-	21,2	T4A - Reparação da Superfície	
Área com betão solto (m <sup>2</sup> )	8,1	17,7	4,6	9,3	9,4	31,4	Inferior da Laje m2	66,0
Juntas deterioradas (m.)	17,7	15,5	47,0	85,4	-	165,6	T4B - Reparação das Juntas	207,0
Bordo da laje partido (m.)	26,8	-	-	-	-	26,8	T4C - Reparação dos bordos	
Bordo da laje fissurado (m.)	26,4	-	-	-	-	26,4	da Laje ( m.)	84,00
Extensão da laje c/armadura à vista (%)	-	-	-	-	33,1	33,1		
Extensão laje fissurada/betão solto(%)	-	-	-	-	38,9	38,9	T5 - Demolição e Reconstrução	432,00
Extensão de laje deteriorada total (%)	-	-	-	-	72,0	72,0		



## **VII - Mapa de medições**



## **VIII - Estimativa de custo da Obra**



## **VIII - Especificações Técnicas**



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

Departamento de Engenharia Civil



## **PEÇAS DESENHADAS**



## **INDÍCE PEÇAS DESENHADAS**

Des. 01 - Planta de Localização Módulo I

Des. 02 - Planta de Localização Módulo II

Des. 03 - Planta de Localização Módulo III e IV

Des. 04 - Planta de Localização de Estacas a Reabilitar – Modulo I

Des. 05 - Planta de Localização de Estacas a Reabilitar – Modulo II

Des. 06 - Planta de Localização de Estacas a Reabilitar – Modulo III e IV

Des. 07 - Pormenores Tipo de Reparação de Estacas e Plataforma

Des. 08 - Pormenores de Execução das Estacas e Faseamento dos Trabalhos



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

Departamento de Engenharia Civil

