

## **Desempenho de reparações em obras sujeitas ao ambiente marítimo**



**António Costa**<sup>1</sup>



**José Paulo  
Costa**<sup>2</sup>



**Júlio Appleton**<sup>3</sup>

### **RESUMO**

A presente comunicação tem como objectivo analisar os aspectos relativos ao desempenho de intervenções de reparação realizadas em estruturas de betão sujeitas à acção do ambiente marítimo.

As estruturas analisadas são obras de grande dimensão que foram objecto de diversas intervenções de reparação desde a sua construção. Trata-se das docas do estaleiro naval da Mitrena as quais apresentam cerca de 35 anos de idade.

Em 2010 foi implementada uma nova fase de reabilitação em duas docas que foram já objecto de reparação anterior. Parte da presente intervenção incide sobre zonas reparadas há cerca de 20 anos permitindo avaliar o desempenho das reparações então realizadas.

Neste artigo descrevem-se as intervenções realizadas anteriormente e as intervenções relativas à recente reabilitação. Caracterizam-se os materiais utilizados, as metodologias de reparação adoptadas e analisa-se a sua eficácia face à evolução da deterioração observada.

A análise realizada permite concluir que mesmo em condições difíceis de execução de trabalhos de reparação e ambientes de elevada agressividade para o betão é possível prolongar a vida das estruturas de forma significativa sem custos demasiado elevados.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Reabilitação  
Corrosão  
Docas

<sup>1</sup> A2P Consult Lda, Rua Acácio de Paiva 27, 1700-004 Lisboa, Portugal. antonio.costa@a2p.pt

<sup>2</sup> STAP, Rua Marquês da Fronteira 8, 3º D, 1070-296 Lisboa, Portugal. jpcosta@stap.pt

<sup>3</sup> A2P Consult Lda, Rua Acácio de Paiva 27, 1700-004 Lisboa, Portugal. julio.appleton@a2p.pt

## **1. INTRODUÇÃO**

O ambiente marítimo constitui uma das condições de exposição mais agressivas para as estruturas de betão armado potenciando o desenvolvimento de mecanismos de deterioração associados à corrosão de armaduras e ao ataque químico do betão.

A elevada agressividade deste ambiente determina as exigentes medidas de protecção definidas na regulamentação mais recente traduzidas por betões com requisitos de composição adequados e elevados recobrimentos de armaduras de modo a constituírem uma barreira contra a penetração de cloretos.

A deficiente divulgação no meio técnico dos aspectos associados à durabilidade de estruturas em ambiente marítimo verificada há algumas décadas conduziu a que algumas obras tivessem sido concebidas e construídas sem os necessários requisitos de protecção. Este aspecto tem levado a significativas intervenções de reabilitação em obras localizadas na zona costeira do país que apresentam deterioração precoce por falta de protecção adequada.

Quando se abordam as diferentes metodologias de reparação das obras surgem normalmente as questões relacionadas com o seu desempenho, pois, na maioria das situações, as intervenções realizam-se em condições de execução difíceis. De facto, a deterioração por corrosão de armaduras induzida pela acção dos cloretos apresenta dificuldades em ser reparada de forma eficaz e duradoura, nomeadamente através de metodologias de reparação tradicionais.

Embora exista hoje uma elevada quantidade de trabalhos publicados sobre reparações em ambiente marítimo o mesmo não se passa relativamente a estudos de avaliação do desempenho a longo prazo das reparações realizadas. Esta informação apresenta uma elevada importância para aferir a eficácia das metodologias de reparação e, deste modo, permitir efectuar as necessárias correcções quando se mostrar necessário.

Neste trabalho abordam-se as reparações realizadas em duas docas que apresentavam uma elevada deterioração por corrosão de armaduras e analisa-se o seu desempenho decorridos cerca de 20 anos após a sua reabilitação.

## **2. DESCRIÇÃO DAS OBRAS**

O estaleiro naval da Mitrena possui três docas executadas na altura da sua construção em 1973/75, designadas por docas 20, 21 e 22. Em 2000 foram executadas mais três docas de modo a aumentar a capacidade do estaleiro para a reparação naval. As obras objecto de análise neste trabalho são as docas 20 e 21.

A doca 20 é uma plataforma concebida inicialmente para a construção naval, sendo constituída por paredes em consola de espessura variável de 0.70 m no topo a 1.20 m na base, figura 1. As paredes estão encastradas numa laje de fundo à cota média +3.0 m com espessura variável de 1.80 m a 1.10 m. A doca apresenta dimensões em planta de 420 m x 75 m e altura de 8.0 m num primeiro troço de 270 m e 10.5 m no restante desenvolvimento.

A doca 21 concebida para a reparação naval apresenta muros laterais com 18.0 m de altura e dimensões em planta de 450 m x 75 m. A laje de fundo está à cota média -7.0 m e apresenta uma geometria idêntica à da doca 20, estando ancorada ao terreno por meio de estacas moldadas de betão armado. Acima do terreno envolvente as paredes laterais apresentam uma geometria idêntica às da doca 20. Na zona enterrada a solução estrutural é constituída por paredes com 0.30 m de espessura apoiadas em grandes contrafortes espaçados de 4.0 m, figura 2.

As duas docas estão alinhadas segundo o eixo longitudinal, funcionando a doca 21 como eclusa da doca 20, apresentando o conjunto um desenvolvimento total de 876 m.

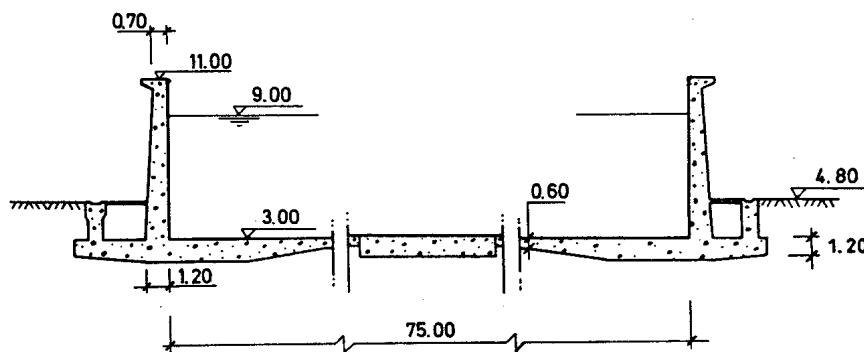


Figura 1. Doca 20 – Corte transversal.

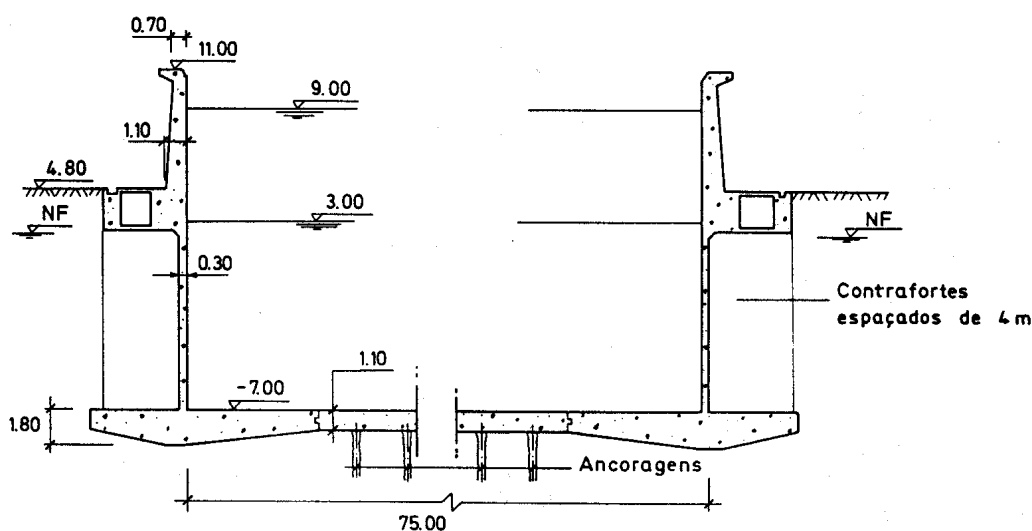


Figura 2. Doca 21 – Corte transversal.

As obras foram executadas em betão armado com composições que apresentavam as seguintes características principais:

Dosagem de cimento: 300 kg/m<sup>3</sup>  
Razão A/C: 0.7  
Tipo de cimento: CPN (actual CEM I)

Os recobrimentos especificados para a obra foram os seguintes.

Paredes: 4.0 cm  
Lajes de fundo: 6.0 cm

Em inspeções e estudos realizados no âmbito da avaliação da deterioração das docas foram identificados os aspectos principais a seguir indicados.

Os recobrimentos medidos nas paredes apresentavam, em geral, variações de 2 a 6 cm. Ensaios realizados a amostras de betão extraídas das paredes e laje de fundo indicaram as seguintes características:

Valor característico da resistência à compressão (paredes): 17.6 MPa  
Valor característico da resistência à compressão (laje): 20.6 MPa

Permeabilidade à água (paredes):  $k = 14 \times 10^{-11}$  m/s  
Permeabilidade à água (lajes):  $k \leq 0.6 \times 10^{-11}$  m/s

## *Desempenho de reparações em obras sujeitas à acção do ambiente marítimo*

Porosidade acessível à água (paredes):  $p = 17.8 \%$

Porosidade acessível à água (laje):  $p = 16.4 \%$

Verifica-se que o betão apresenta qualidade inadequada para obras localizadas em ambiente marítimo. Nestas condições os cloretos são transportados para o interior do betão a um ritmo elevado conduzindo à rápida despassivação das armaduras.

Importa referir que num betão com estas características os mecanismos de transporte rápidos, permeação e absorção, prevalecem sobre o mecanismo de transporte lento, difusão, e a duração da fase de iniciação do mecanismo da corrosão é praticamente desprezável. A evolução da deterioração, fase de propagação, vai depender da velocidade com que se desenvolve a corrosão das armaduras.

No presente caso é o processo catódico que constitui o principal parâmetro que controla a velocidade de corrosão, isto é, a disponibilidade de oxigénio ao nível das armaduras para alimentar a reacção catódica.

A evolução da deterioração observada nas docas foi determinada por este aspecto. Nos elementos com superfícies sujeitas a ciclos de molhagem/secagem com longos períodos de intervalo desenvolveram-se elevadas velocidades de corrosão pelo facto de existir fácil acesso de oxigénio às armaduras. Em elementos com superfícies sujeitas a ciclos de molhagem frequentes a deterioração evoluiu de forma mais lenta dado que o elevado teor em água dos poros do betão restringiu o acesso de oxigénio.

A primeira situação foi observada nas paredes da doca 20 e zona superior das paredes da doca 21. A segunda situação foi observada na zona inferior das paredes da doca 21. Em 1978, três anos após a conclusão das obras, as docas apresentavam sinais evidentes de deterioração com maior relevância nas paredes da doca 20. A figura 3 ilustra a deterioração das paredes da doca 20 antes da realização da reparação de 1991/92.



Em 1984 realizou-se uma primeira intervenção de reparação nas paredes da doca 20 envolvendo uma área de 3600 m<sup>2</sup>. Em 1988 foi efectuada uma segunda fase de reparação envolvendo a zona superior da doca 21 numa extensão de 5600 m<sup>2</sup>. Estas duas intervenções envolveram metodologias de reparação diferentes.

Na doca 20 foi implementada uma reparação por substituição global da camada de betão envolvente das armaduras por uma nova camada de betão moldado. Na doca 21 o betão envolvente das armaduras foi substituído por betão projectado.

Em 1991/92 efectuou-se a terceira fase de reparação das paredes das docas envolvendo as faces interiores e exteriores numa extensão total de 23 400 m<sup>2</sup>. A metodologia de reparação implementada

foi a substituição do betão envolvente das armaduras com betão projectado por via seca com máquinas de câmara dupla.

### **3. CARACTERIZAÇÃO DA INTERVENÇÃO DE 1991/92**

A terceira fase de reparação das paredes das docas 20 e 21 envolveu os seguintes procedimentos principais:

- Remoção do betão existente envolvente das armaduras até uma profundidade mínima de 10 cm, garantindo um corte mínimo de 2 cm para além das armaduras;
- Preparação da superfície do betão e decapagem das armaduras com projecção de jacto de areia húmida seguida de lavagem com jacto de água e remoção da água em excesso por ar comprimido;
- Betonagem com betão projectado por via seca garantindo uma espessura mínima de recobrimento de 4 cm, espessura igual ao recobrimento existente;
- Cura húmida do betão num período mínimo de 7 dias.

A remoção do betão foi realizada com martelos pneumáticos. A limpeza das armaduras com jacto de areia húmida foi realizada com o equipamento de projecção de betão. Esta operação garante simultaneamente a preparação da superfície do betão. A lavagem final das superfícies e a remoção da água em excesso com jacto de ar foi também realizada com o mesmo equipamento. Esta metodologia garante um elevado rendimento dos trabalhos de reparação. Na figura 4 ilustra-se um aspecto das armaduras e da superfície do betão antes da betonagem.



Figura 4. Aspecto das superfícies após a preparação.

A composição adoptada para o betão projectado foi a seguinte:

Brita ( $D_{\text{máx}}$ 9.56 mm)	2003 kg/m <sup>3</sup>
Cimento CPN 30 (CEM I)	350 kg/m <sup>3</sup>
Sílica de fumo	15 kg/m <sup>3</sup>
Água	145 kg/m <sup>3</sup>

Dado que no método de projecção por via seca a água é adicionada no canhão de projecção pelo operador o controlo da quantidade de água foi efectuado em termos médios através da leitura de contadores instalados no equipamento.

No processo de projecção ocorre uma perda significativa de material por ricochete envolvendo essencialmente agregados. A análise da composição do material perdido por ricochete permitiu recalcular a composição do betão efectivamente colocado nas paredes tendo-se verificado que a dosagem de cimento foi da ordem de 500 kg/m<sup>3</sup>.

## *Desempenho de reparações em obras sujeitas à acção do ambiente marítimo*

As características do betão projectado obtidas nos ensaios de controlo de qualidade foram, em média, as seguintes:

Valor característico da resistência à compressão:	57.5 MPa
Permeabilidade à água:	19 mm
Porosidade acessível à água:	13.2 %

O ensaio de permeabilidade consistiu na medição da profundidade de penetração de água em provetes submetidos a uma pressão hidrostática de 50m de coluna de água durante 48 horas.

Na figura 5 ilustra-se a reparação das paredes da doca 20 e 21.



Figura 5. Reparação da paredes.

A execução dos trabalhos no interior da doca 21 decorreu com elevada dificuldade dada a necessidade de manter esta doca operacional. A normal utilização da doca para reparação de navios correspondia a ciclos de enchimento com intervalos médios de duas a três semanas. Esta situação implicava a exposição do betão de reparação ao contacto com água salgada a idades muito jovens, o mesmo de passando com as superfícies de betão recentemente removido originando uma maior contaminação por cloretos do betão interior das paredes.

Perante estas condições a qualidade dos trabalhos de reparação foi significativamente prejudicada colocando-se algumas dúvidas quanto à eficácia e durabilidade desses trabalhos. Acresce a este aspecto as dificuldades associadas à metodologia de colocação do betão no que se refere ao total preenchimento da zona posterior dos varões com material de qualidade adequada.

A eficácia da reparação das paredes das docas 20 e 21 foi monitorizada ao longo de 5 anos através da medição da penetração de cloretos.

Nas figuras 6 e 7 mostram-se os perfis de cloretos medidos em duas zonas das paredes das docas 20 e 21, respectivamente. Uma das zonas corresponde à parede Este e a outra corresponde à parede Oeste em cada uma das docas.

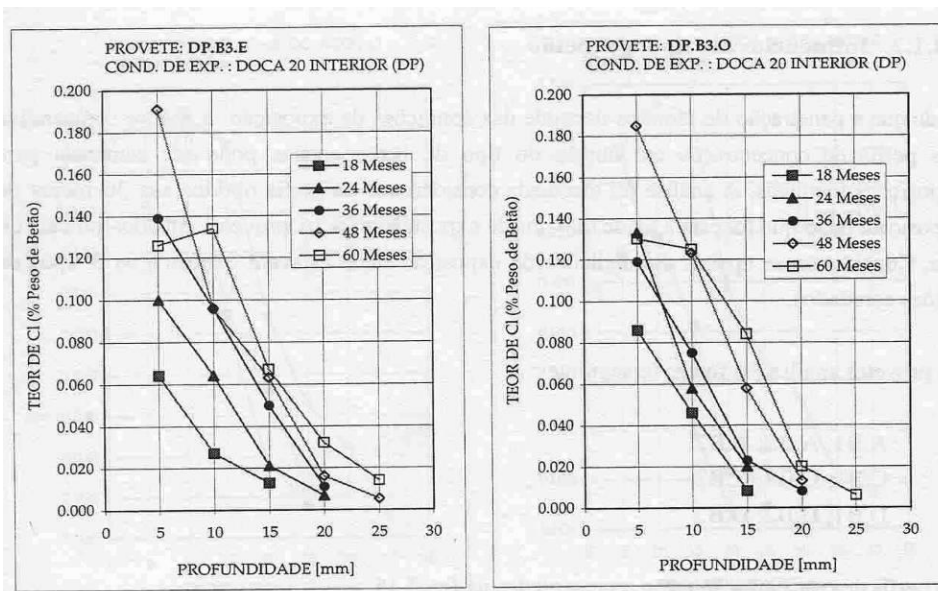
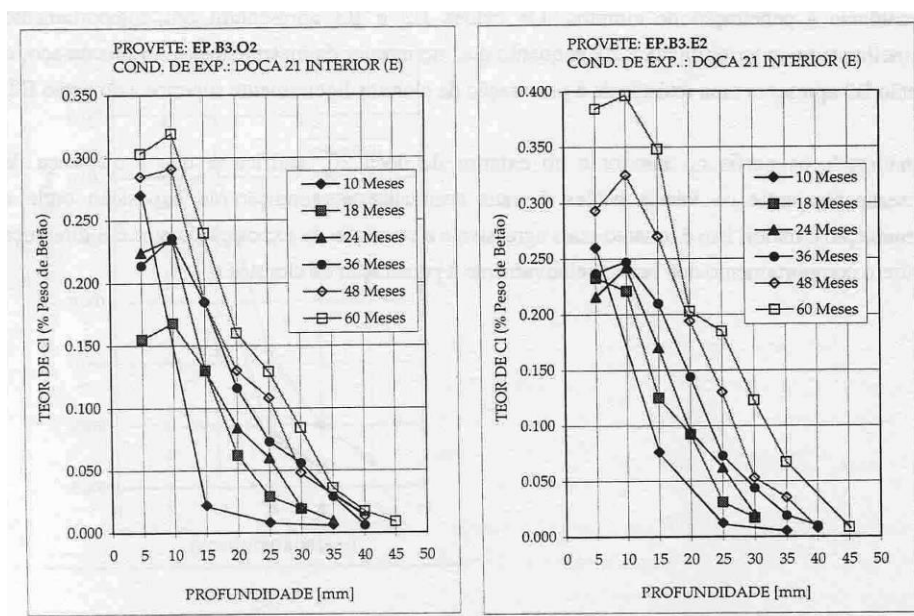


Figura 6. Perfis de cloretos nas paredes no interior da doca 20.



Com base nos resultados da monitorização foram estabelecidas as leis de penetração de cloretos no betão para cada uma das docas com base na 2ª lei de difusão de Fick. As leis de difusão definidas têm em consideração a variação no tempo do coeficiente de difusão aos cloretos no betão e do teor de cloretos à superfície [1].

Com base nessas leis foram definidas as expressões que definem a penetração do teor crítico de cloretos ao longo do tempo para cada situação de exposição:

$$x_{cr} = 2 \sqrt{D_1 t^{1-m}} \cdot \text{erf}^{-1} \left( 1 - \frac{C_{cr}}{C_1 t^n} \right)$$

Em que:

$x_{cr}$  – profundidade de penetração do teor crítico de cloretos após o tempo de exposição  $t$

$D_1$  – coeficiente de difusão do betão a um ano de idade de exposição

$t$  – tempo de exposição

$C_{cr}$  – teor crítico de cloretos

$C_1$  – teor de cloretos à superfície do betão após um ano de exposição

## Desempenho de reparações em obras sujeitas à acção do ambiente marítimo

$m$ ;  $n$  – coeficientes que traduzem a evolução no tempo do coeficiente de difusão e do teor de cloretos à superfície.

Para o betão em causa, tendo em conta a dosagem de cimento de  $500 \text{ kg/m}^3$  foi considerado um teor crítico de cloretos de  $0.08\%$  da massa de betão.

Da análise dos perfis de cloretos medidos nas paredes obtiveram-se os seguintes valores para os parâmetros da expressão acima indicada:

Doca 21 :  $D_1 = 3.11 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ;  $C_1 = 0.31\%$ ;  $m = 0.59$  ;  $n = 0.33$

Doca 20 :  $D_1 = 0.88 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ;  $C_1 = 0.11\%$ ;  $m = 0.42$  ;  $n = 0.61$

Os gráficos indicados nas figuras 8 e 9 mostram a evolução da penetração do teor crítico de cloretos ao longo do tempo nas paredes da doca 20 e 21.

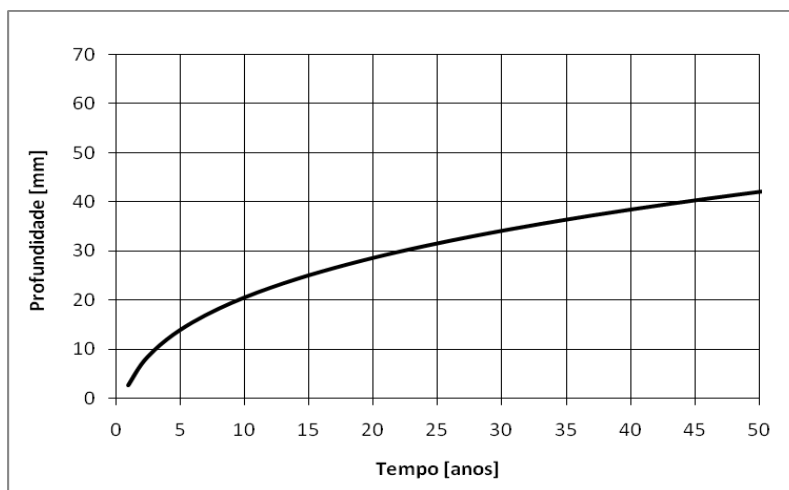


Figura 8. Penetração do teor crítico de cloretos nas paredes no interior da doca 20.

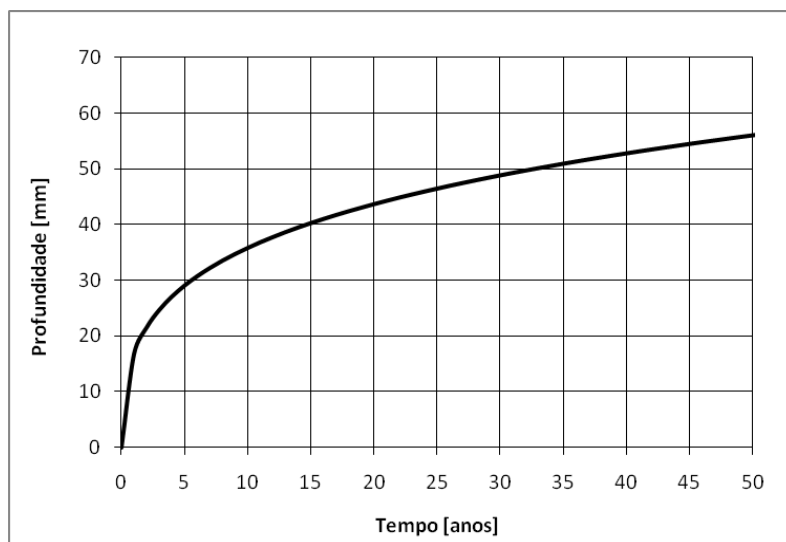


Figura 9. Penetração do teor crítico de cloretos nas paredes no interior da doca 21.

Nas paredes da doca 21 a modelação previa a despassivação das armaduras ao fim de 15 anos considerando  $40 \text{ mm}$  de betão de recobrimento das armaduras. Nas paredes da doca 20 a modelação previa a despassivação das armaduras ao fim de 44 anos considerando o mesmo recobrimento das armaduras. Estes períodos de tempo correspondem ao tempo de iniciação do processo de deterioração por corrosão de armaduras. A modelação mostra também que a pequenas variações do recobrimento correspondem elevadas variações do período de iniciação.

#### 4. REABILITAÇÃO DE 2010

Em 2009/2010 realizou-se uma nova intervenção nas docas 20 e 21 envolvendo a reparação da laje de fundo da doca 20, reparação das galerias laterais das duas docas e ainda a reparação das paredes laterais em zonas já anteriormente reabilitadas. Nesta intervenção a totalidade da área reparada foi da ordem de 19.000 m<sup>2</sup>, sendo a maior parcela da reparação relativa à laje de fundo da doca 20.

A intervenção nas paredes laterais envolveu a faixa intermédia das faces interiores na doca 21 reparada em 1988 e as faces interiores e exteriores das duas docas reparadas em 1991/92. A figura 10 ilustra a deterioração das paredes observando-se zonas localizadas com delaminação do betão.

A metodologia de reparação das paredes foi idêntica à realizada em 1991/92.



interior intermédia; b) doca 20 face exterior

A zona das paredes interiores da doca 20 reparada em 1984 com betão moldado apresenta-se em estado razoável não se observando ainda delaminação por corrosão de armaduras.

A análise do comportamento das paredes relativamente à deterioração veio mostrar que nas zonas afectadas por delaminação devida à corrosão o fenómeno foi, essencialmente, causado por um reduzido recobrimento das armaduras. Esta deficiência de execução foi observada principalmente nas faces exteriores das paredes e na face interior da parede da doca 20, onde se verificaram recobrimentos relativamente baixos da ordem de 15 – 20 mm. Para este nível recobrimentos a modelação da penetração do teor crítico de cloretos definida na figura 8 indica períodos de iniciação da ordem de 10 anos, valor que está de acordo com a deterioração observada.

No quadro 1 indicam-se as áreas delaminadas e as taxas de reincidências da deterioração observadas nas paredes das docas.

Quadro 1 – Áreas delaminadas e percentagem de reincidência.

<i>Doca 21</i>			
<i>Paredes interiores</i>	<i>Área delaminada</i>	<i>Área total</i>	<i>Reincidência</i>
	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[%]
Faixa intermédia			
Nascente	748	2712	28
Poente	486	2712	18
Faixa inferior			
Nascente	157	4195	4

*Desempenho de reparações em obras sujeitas à acção do ambiente marítimo*

Poente	106	4195	3
<i>Paredes exteriores</i>			
Nascente	273	2682	10
Poente	342	2682	13
<i>Doca 20</i>			
<i>Paredes interiores</i>	<i>Área delaminada</i>	<i>Área total</i>	<i>Reincidência</i>
	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[%]
Nascente	205	2819	7
Poente	300	2819	11
<i>Paredes exteriores</i>			
Nascente	699	2858	24
Poente	967	2858	34

No interior da doca 21 verifica-se que o maior nível de deterioração ocorre na faixa intermédia reparada em 1988 (22 anos de idade). Importa salientar a diferença entre o nível de deterioração verificado nas faces voltadas a poente (parede nascente) e faces voltadas a nascente (parede poente) originado pela maior exposição solar das primeiras que, conseqüentemente, ficam sujeitas a temperatura mais elevada a qual induz uma maior velocidade de corrosão.

Na faixa inferior, reparada em 1991/92 (19 anos de idade) a deterioração é ainda muito reduzida evidenciando o bom desempenho da reparação realizada. Nesta zona não se verificaram as deficiências de recobrimento de armaduras constatadas nas outras zonas. O comportamento observado está de acordo com o período de iniciação previsto pela modelação indicada na figura 9. Interessa ainda salientar que nesta condição de exposição particular, caracterizada por ciclos de molhagem frequentes, o período de propagação pode ser significativo como ilustra a ainda muito reduzida área delaminada. Nestas condições de exposição o elevado teor em água do betão controla a velocidade de corrosão por limitar o acesso de oxigénio às armaduras.

A análise realizada permite concluir que é possível implementar metodologias de reparação tradicionais com bom desempenho em obras sujeitas à acção do ambiente marítimo com elevada deterioração e contaminação por cloretos. O comportamento das reparações realizadas nas docas ilustra a importância que o recobrimento de armaduras apresenta na durabilidade dessas reparações. De modo a garantir um desempenho adequado das intervenções é necessário efectuar um controlo efectivo do recobrimento de armaduras, aspecto que se coloca com maior relevância no caso da metodologia de reparação envolver a colocação do betão por projecção. Para além do recobrimento o desempenho da reparação depende da qualidade da preparação das superfícies do betão e armaduras e do desempenho do betão como barreira à penetração de cloretos. Sob este aspecto a metodologia de reparação com betão projectado por via seca mostrou apresentar uma eficácia adequada.

## REFERÊNCIAS

[1] – COSTA, A. – Durabilidade de estruturas de betão armado em ambiente marítimo. IST, Lisboa, 1997, 545p.