

**AValiação da Variabilidade Espacial na Previsão da Vida Útil
Segundo Proposta Probabilística: Caso de Plataformas
Offshore no Brasil**

Alexandre da Costa Pereira

Engenheiro Civil – D.Sc. em Construção Civil (UPM) e M.Sc. em Geotecnia (UFPe)
IFRN-RN – Professor do Departamento de Construção Civil
alexandre.pereira@ifrn.edu.br

Jaime Fernández Gómez

Dr. Engenheiro de Estradas, Canais e Portos (*Universidad Politécnica de Madrid - UPM*)
Universidade Politécnica de Madri – Professor Catedrático de Edificação e Pré-Fabricação
da Escola Técnica Superior de Engenheiros de Estradas, Canais e Portos
jfernandez@intemac.es

Amparo Moragues Terrades

Dra. Química (*Universidad Complutense de Madrid - UCM*)
Universidade Politécnica de Madri – Professora de Química dos Materiais da Escola
Técnica Superior de Engenheiros de Estradas, Canais e Portos
amoragues@upm.es

RESUMO

Se apresentam no trabalho considerações sobre a influência da variabilidade da evolução na probabilidade de danos devido ao fator solitação ambiental, bem como sobre a aplicabilidade do objeto de estudo como critério de decisão em sistemas de manutenção para estruturas *offshore* de concreto submetidas às condições impostas pelo ambiente marinho tropical. Duas plataformas *offshore* de concreto, construídas em 1976, foram selecionadas para a pesquisa. O plano experimental constou de campanha de ensaios *in situ* e de laboratório executados sobre testemunhos extraídos das plataformas. Perfis de cloretos foram determinados para distintas orientações e diferentes cotas sobre o nível do mar, além de terem sido determinadas características e propriedades do material relacionadas com a durabilidade. Os resultados obtidos indicam que existe importante influência na variabilidade espacial, tanto na intensidade como na frequência da ação ambiental sobre as obras estudadas. Também se observou que os métodos probabilísticos analisados representam ferramenta para o estudo da influência da variabilidade espacial, aplicados ao caso da previsão da vida útil de estruturas marinhas. O modelo é indicado para ser utilizado como critério de decisão em sistemas de manutenção estrutural.

PALAVRAS-CHAVE: Estruturas *Offshore*, Ambiente Marinho, Durabilidade, Corrosão das Armaduras, Métodos Probabilísticos.

**SPATIAL VARIABILITY EVALUATION APPLIED ON SERVICE LIFE
PREDICTION BY PROBABILISTIC METHODS: BRASILIAN OFFSHORE
PLATFORMS CASE**

ABSTRACT

This paper addresses the impact of such variability on the patterns of probability of failure due to environmental forces and puts forward a proposal for incorporating this

consideration in maintenance system decision-making respecting concrete structures exposed to offshore tropical marine environments. Two offshore concrete oil rigs built in 1976 were chosen as the object of the research. The experimental programme included non-destructive *in situ* as well as laboratory tests, the latter conducted on cylindrical cores taken from the platforms. Chloride profiles were established, along with durability characteristics and other concrete properties. The results show substantial spatial variability in the intensity and frequency of environmental aggression on the structures studied. In the analysis of probabilistic methods as a tool for studying the impact of spatial variability on service life prediction in marine structures likewise, the model was likewise found to be suitable for use in structural maintenance system decision-making.

KEY-WORDS: *Offshore Structures*, Marine Environment, Durability, Rebar Corrosion, Probabilistics Methods.

**AValiação da Variabilidade Espacial na Previsão da Vida Útil
Segundo Proposta Probabilística: Caso de Plataformas
Offshore no Brasil**

INTRODUÇÃO

A previsão da vida útil e residual de estruturas é objeto de considerável importância econômica. Em diversos países, a administração eficiente da infraestrutura depende da aplicação de sistemas de inspeção e manutenção apropriados. O processo de tomada de decisão nestes sistemas, como, por exemplo, o caso da definição do momento para a realização de reparos, deve considerar tanto aspectos de racionalidade econômica como atender determinados níveis de segurança para as obras. Convém destacar que a não consideração de um adequado sistema de inspeção e manutenção conduz a níveis inaceitáveis de segurança, bem como ao aumento do risco de ocorrência de reparos emergenciais de custo mais elevado.

O presente trabalho se fundamenta em informações obtidas em pesquisa desenvolvida utilizando-se de duas singulares plataformas petrolíferas, construídas em concreto e situadas a aproximadamente 12 km do litoral setentrional do Rio Grande do Norte, a 5° de latitude sul. As plataformas em questão foram construídas em 1976 e se apresentam visivelmente deterioradas, apesar dos reparos realizados nas mesmas.

O plano experimental consistiu na realização de campanha de ensaios *in situ*, extração de testemunhos e ensaios de laboratório. Quanto à campanha de ensaios de durabilidade sobre os testemunhos extraídos, foram realizados os seguintes: perfis de cloretos determinados para orientações e cotas diversas, obtenção de coeficientes de difusão, propriedades mecânicas do concreto, permeabilidade à água sob pressão, entre outros. A partir dos resultados encontrados, principalmente os relacionados com as variáveis espessura de cobrimento, perfis de penetração de cloretos e coeficientes de difusão, se considerarão possíveis aplicações práticas de modelos probabilísticos para a tomada de decisão em sistemas de manutenção para estruturas de concreto expostas a ambientes marinhos.

Convém chamar atenção ao fato de que durante a vida econômica residual da estrutura, as medidas necessárias para a obtenção de uma performance mínima são relativamente mais caras que as correspondentes ações preventivas visando a manutenção de níveis de serviço aceitáveis, principalmente relacionados à despassivação das armaduras. Dado que em ambiente muito agressivo, como é o caso do comentado neste trabalho, a propagação dos danos nos pontos de despassivação da armadura é substancialmente mais rápido quando se compara a condições normais, o que implica na importância da definição do adequado nível para o custo correspondente à manutenção preventiva a ser considerado na análise econômica do ciclo de vida das obras.

Por estas razões, a probabilidade de dano (no caso a despassivação), P_f , em estruturas para idades superiores à da despassivação das armaduras, se apresenta como parâmetro que condiciona o custo dos trabalhos de manutenção corretiva nas mesmas.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para a determinação do nível econômico ótimo para o Estado Limite de Durabilidade neste caso (despassivação, fissuração,...), pode-se recorrer a uma expressão que tem em conta os

componentes de custo inicial, custos de manutenção e custos derivados da reparação dos danos para um determinado nível de probabilidade de ocorrência $P_f(t_i)$. A Equação 01 pode ser utilizada para a avaliação econômica dos sistemas de manutenção das estruturas mediante técnicas de análise do Ciclo de Vida (*Life Cycle Cost Analysis*).

As avaliações de confiabilidade correspondentes a estes estudos se realizariam segundo técnicas de Nível IV, onde se considera a otimização econômica do caso em conformidade com a caracterização estatística das variáveis que intervêm e a análise econômica correspondente ao custo total da estrutura avaliada.

$$C_T = C_o + \sum_{i=0}^{t_1} \frac{M_i}{(1+r)^i} + \sum_{i=0}^{t_1} \left\{ P_f(t_i) \times \left(\frac{D_i}{(1+r)^i} \right) \right\} \quad (\text{Equação 1})$$

onde:

C_o = Custo inicial da estrutura.

M_i = Custo de manutenção, ano i , da estrutura.

$P_f(t_i)$ = Probabilidade de dano no ano i .

D_i = Danos associados ao não-cumprimento com o Estado Limite de Durabilidade considerado.

t_1 = Vida útil sobre a qual se planeja a análise econômica.

r = Parâmetro de capitalização do dinheiro.

O processo de otimização econômica de baseia na determinação do ponto no qual o custo total C_T da estrutura possua valor mínimo para o período t_1 correspondente à Vida Útil considerada na análise.

Simplificando o problema mediante a consideração de que o componente de custo de manutenção é igual a zero, temos:

$$C_T = C_o + \sum_{i=0}^{t_1} P_f(t_i) \times \frac{D_i}{(1+r)^i} \quad (\text{Equação 2})$$

Convêm destacar que a função do componente $\sum_{i=0}^{t_1} \frac{M_{i,j}}{(1+r)^i}$, para um determinado nível de esforço de manutenção j , da Equação 01 pode ser interpretada como o esforço necessário para que a curva definida $\sum_{i=0}^{t_1} P_f(t_i) \times \frac{D_{i,j}}{(1+r)^i}$ apresente um comportamento segundo o previsto no modelo que se planeja para a análise econômica.

Conforme se apresenta na Figura 01, a variação na probabilidade de dano ($Pf_1 > Pf_2$) derivada de um sistema de manutenção ineficiente conduz ao aumento no custo total ($CT_2 > CT_1$) para um nível equivalente de confiabilidade ($\beta_1 \approx \beta_2$) correspondente ao novo ponto de otimização para a análise econômica.

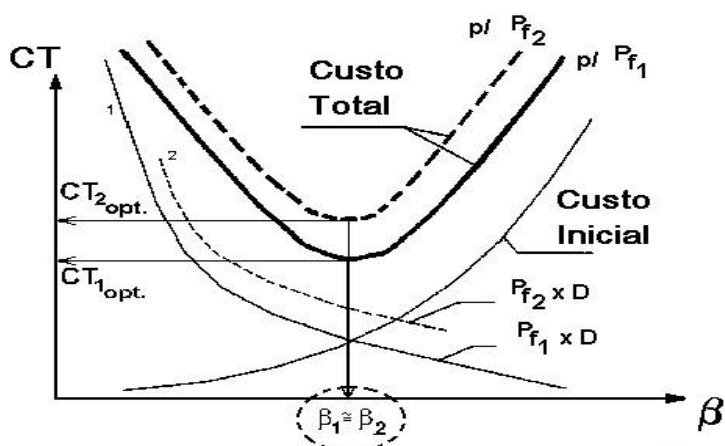


Figura 1- Influência do sistema de manutenção na determinação do ponto de otimização.

Tendo em conta que os estudos sobre a influência da variabilidade espacial põe em evidência a importância do fator orientação das regiões das estruturas investigadas na evolução da probabilidade de dano P_f , e que a aplicação dos modelos probabilísticos se presta como ferramenta capaz de avaliar adequadamente $P_f(t)$, estes modelos podem ser muito úteis no processo de decisão ao longo da vida em serviço das obras.

IZQUIERDO GÓMEZ⁽²⁾ apresenta os valores da Tabela 1 como índices de confiabilidade recomendados para o projeto referente ao Estado Limite de Durabilidade, calibrados mediante otimização econômica, considerando os custos devido à ocorrência de danos e os custos iniciais decorrentes do incremento da segurança frente ao dano.

Tabela 1- Valores de β mediante otimização econômica referente ao E.L.D⁽²⁾.

Custo referente à segurança	Custo devido a ocorrência de dano		
	Baixo	Médio	Alto
Baixo	1.20	2.00	2.50
Médio	1.00	1.80	2.45
Alto	0.50	1.50	2.40

Além da utilidade como alternativa na definição do índice de confiabilidade e do conseqüente período até alcançar o nível mínimo de prestações admitido, poderíamos destacar o emprego dos modelos probabilísticos na análise da eficácia dos sistemas de manutenção utilizados para as estruturas.

A análise contínua da evolução de P_f , conforme se comentou na apresentação do modelo probabilístico de nível IV para a determinação do ponto de otimização econômica, é uma ferramenta possível para a manutenção da evolução de $P_f(t)$ nos limites definidos no projeto da Vida Útil para uma estrutura.

O conhecimento de como evolui a curva $P_f(t) \times D$ representa um passo obrigatório para que o nível de confiabilidade considerado para a determinação do ponto ótimo econômico

realmente conduza ao Custo Total mínimo para a obra. Ou seja, se adotamos o Custo Inicial C_i como uma função linear de β em relação à corrosão das armaduras em um determinado nível de confiabilidade (β), controlar a variação na probabilidade de dano mediante um sistema de manutenção eficiente conduziria à sempre buscada otimização econômica dos projetos.

Em conformidade com os resultados encontrados para a evolução do índice de confiabilidade para os diferentes costados das plataformas, e considerando-se a importância da determinação confiável dos períodos de despassivação e de propagação do processo de deterioração, se apresenta na Figura 2 uma representação gráfica para diferentes curvas $P_f(t)$ com destaque para os elementos principais que as diferenciam.

Conforme se apresenta na Figura 2, pode-se diferenciar quatro zonas distintas dependendo da evolução da probabilidade de dano. Nas zonas 1 e 4 ocorre a coincidência na consideração referente ao período de despassivação e do período de propagação para a aplicação dos correspondentes coeficientes $D(d)$ e $D(p)$ para representar os custos dos danos durante os períodos de despassivação e de propagação.

Na Zona 2, a consideração $P_f(t)$ média conduz provavelmente a uma subestimativa da probabilidade de dano P_f no período $\Delta t = t_m - t_1$, no qual a ineficiência do sistema de manutenção implica no aumento da inclinação da curva $D \times P_f(t)$ devido à propagação dos danos ($\gg D$) neste período.

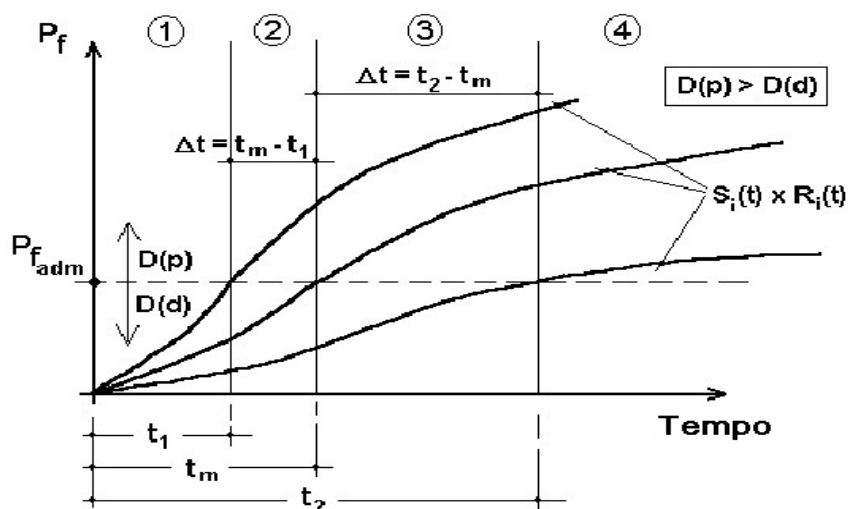


Figura 2- Evolução de D para diferentes curvas $P_f(t)$.

Para a Zona 3, a consideração de $P_f(t)$ média conduz provavelmente a um desperdício de recursos devido à sobrestimativa de P_f no período $\Delta t = t_2 - t_m$ para orientações menos deterioradas (neste trabalho, o costado Este) e, por outro lado, a subestimativa dos custos correspondentes na regiões que sofreram um aumento no valor previsto para os custos dos danos.

O PROBLEMA ANALISADO

Considerações sobre as obras

As obras objeto de estudo consistem em plataformas *offshore* PUB-02, PUB-03 e PAG-02, em operação no Brasil desde 1976. São as primeiras estruturas deste tipo realizadas em

todo o Continente Americano, constituindo-se em verdadeiros protótipos. Foram projetadas devido à necessidade da Petrobrás por plataformas em condições de operar em lâminas de mar de 15m e que fossem capazes de perfurar poços, produzir, tratar e armazenar petróleo. Apresenta-se nas Figuras 3 e 4, respectivamente, a localização e o aspecto geral das plataformas.

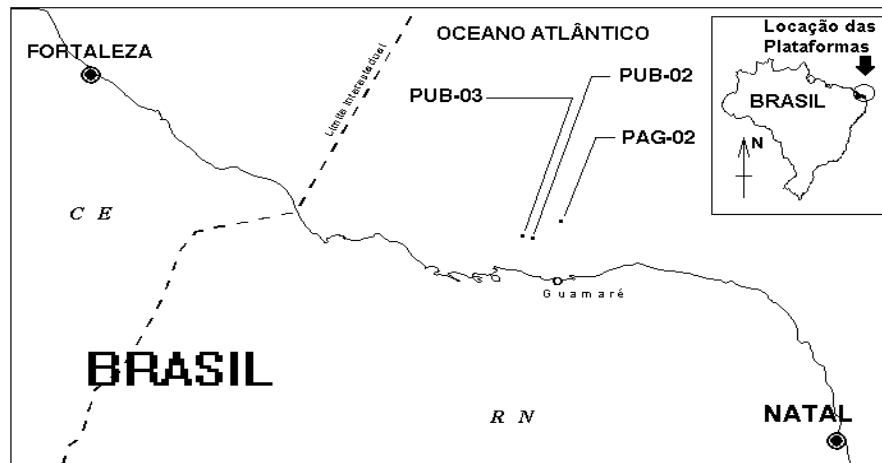


Figura 3- Localização das obras estudadas

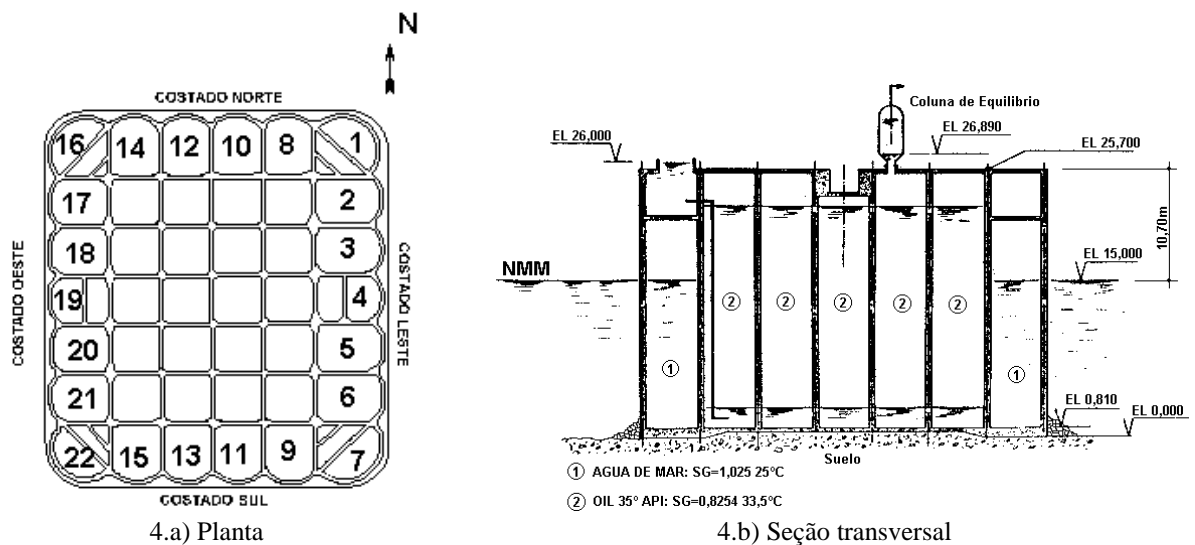


Figura 4- Aspecto geral das plataformas.

Para a caracterização física do material das amostras de concreto se recorreu a relatórios técnicos de controle de qualidade realizados durante o período de execução das plataformas⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾, a ensaios para a definição de perfis do conteúdo de cloretos e de cimento para os testemunhos extraídos, realizados no Laboratório Central INTEMAC (Madri – Espanha), e ensaios sobre provetas moldadas a partir das amostras obtidas que se realizaram Laboratorio de Química de la *Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid*.

Tabela 2- Valores característicos determinados para o concreto.

PARÂMETRO	VALOR MÉDIO
Conteúdo de cimento	526,11 kg/m ³
Densidade aparente	2,354 kg/dm ³
Porosidade total	11,34 %
Resistência à compressão	56,95 MPa
Resistência à tração indireta	4,1 MPa
Coefficiente de difusão efetivo	$0,532 \pm 0,435 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$
Coefficiente de difusão aparente	$1,157 \pm 1,015 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$
Coefficiente de absorção capilar	0,20 – 0,45 g/cm ²
Velocidade de propagação ultrassônica	4,6 – 5,0 km/s

Para a determinação de perfis de penetração de cloretos em distintas zonas das obras estudadas, se realizou uma extensa campanha de ensaios de laboratório com um conjunto de 54 testemunhos de concreto representativos do material constituinte dos costados das plataformas. A realização da determinação do conteúdo de cloretos no material estudado se realizou segundo o que dispõe as normas espanholas UNE 80-217-91: 1991 (norma europeia EM 196-21: 1989) e UNE 112-010-94: 1994.

METODOLOGIA UTILIZADA: ESTUDO DA VARIABILIDADE NAS CUVAS P_F PARA O CASO DAS PLATAFORMAS BRASILEIRAS

Para a investigação sobre a importância e a aplicabilidade da variabilidade espacial nos métodos probabilísticos para a previsão da vida útil de estruturas de concreto, se realizou a análise de parâmetros e características diversos obtidos mediante os ensaios *in situ* e de laboratório realizados sobre o total de 80 testemunhos extraídos das obras.

A metodologia utilizada na pesquisa se baseou na hipótese de que as variáveis cobertura das armaduras (R) e profundidade de penetração crítica (S) se caracterizam como estocásticas (variáveis randômicas), ajustando-se à função normal de distribuição⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾. Para a definição de “S” se considerou como conteúdo crítico de cloretos no concreto o limite de 0,4% em relação à massa de cimento.

Para os estudos da aplicação da variável R nos modelos de determinação da probabilidade de corrosão, além da distribuição estatística dos valores medidos diretamente sobre os testemunhos, se considerou também na análise o valor de cobertura mínimo ($R_{\min}=60\text{mm}$; coeficiente de variação de 16,67%) especificado para esta variável no projeto das obras estudadas.

Para os estudos da aplicação da variável R nos modelos de determinação da probabilidade de corrosão, além da distribuição estatística dos valores medidos diretamente sobre os testemunhos, se considera também na análise o valor do cobertura mínimo especificado para esta variável no projeto das obras estudadas.

Tabela 3- Valores determinados para a variável “S”.

COSTADO	μ_s (mm)	σ_s (mm)
N	59,40	13,22
S	61,00	21,21
E	66,50	19,91
W	45,62	7,68
MÉDIA	56,41	16,43

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a avaliação da influência do fator variabilidade espacial na probabilidade de corrosão (P_f , %) para o ambiente marinho em questão, se considera fundamentalmente a influência da variável orientação (N, S, E e W) para os costados das plataformas *offshore* investigadas. Se considera para a definição do citado gráfico que, para a idade atual das obras ($t=25$ anos), $P_f = 10\%$ corresponde ao índice de confiabilidade $\beta = 1,2825$, com os valores de μ_s e σ_s indicados na Figura 5 e que a relação entre as variáveis R e S está governada pela Equação 3.

$$\mu_R = \mu_S + 1,2825 \times \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \tag{Equação 3}$$

Convém destacar que, além dos maiores valores relativos para as variáveis que intervêm na definição de P_f apresentados pelos costados das plataformas submetidos à ação mais intensa dos agentes agressivos presentes no ambiente (orientações Leste e Sul), ocorre o deslocamento da região do perfil dos costados correspondente aos maiores valores de P_f , tal como se apresenta na Figura 6, onde se comparam gráficos P_f versus Cota para os costados Oeste e Leste que, respectivamente, correspondem às orientações onde se observaram estados de menor e maior risco de degradação por corrosão.

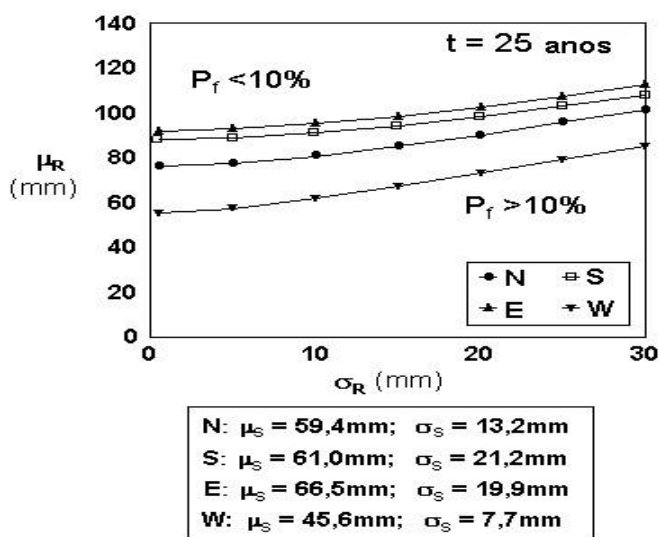


Figura 5- Curvas P_f (10%) para diferentes orientações nas plataformas.

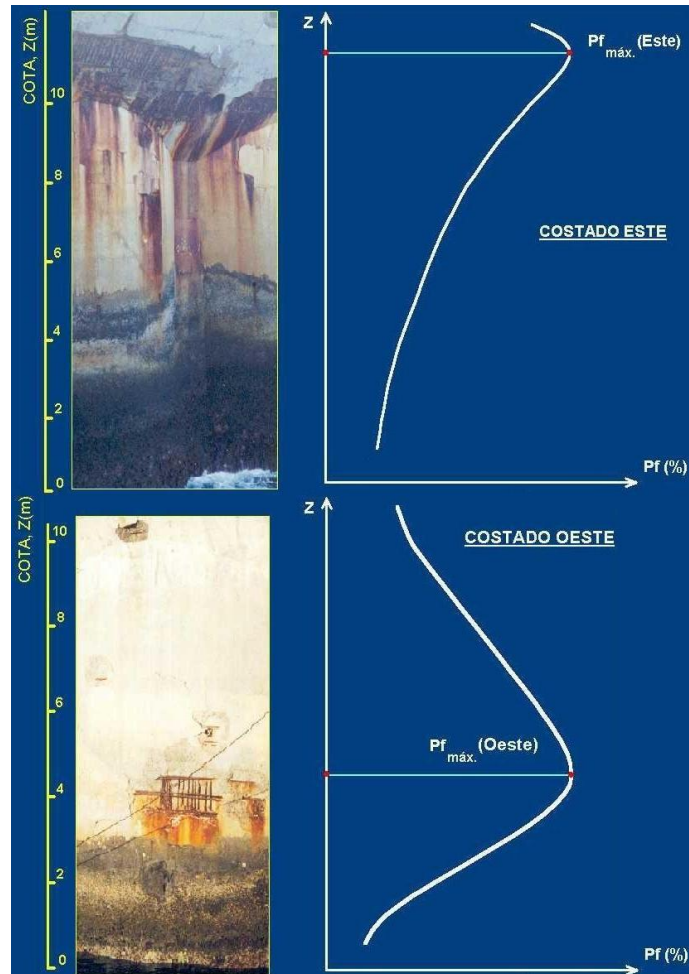


Figura 6- Influência das variáveis cota e orientação na posição e magnitude de P_f .

Considerando o comportamento evolutivo do coeficiente de difusão efetivo “ D_{ap} ” obtido mediante as regressões realizadas para “ t ” considerado igual a 24 ou 25 anos, se admite a utilização da Equação 4 para o cálculo de D_{ap} (cm^2/s) em função do tempo⁽⁷⁾.

$$D_a(t) = D_a(t_o) \times \left(\frac{t_o}{t} \right)^{n_{mat}} \quad (\text{Equação 4})$$

onde:

$D_a(t_o)$ = Coeficiente de difusão aparente, em cm^2/s , no tempo de referencia t_o .

n_{mat} . = Fator de idade do material = 0,2967⁽⁷⁾.

t = Tempo, em anos.

t_o = Tempo de referência, em anos.

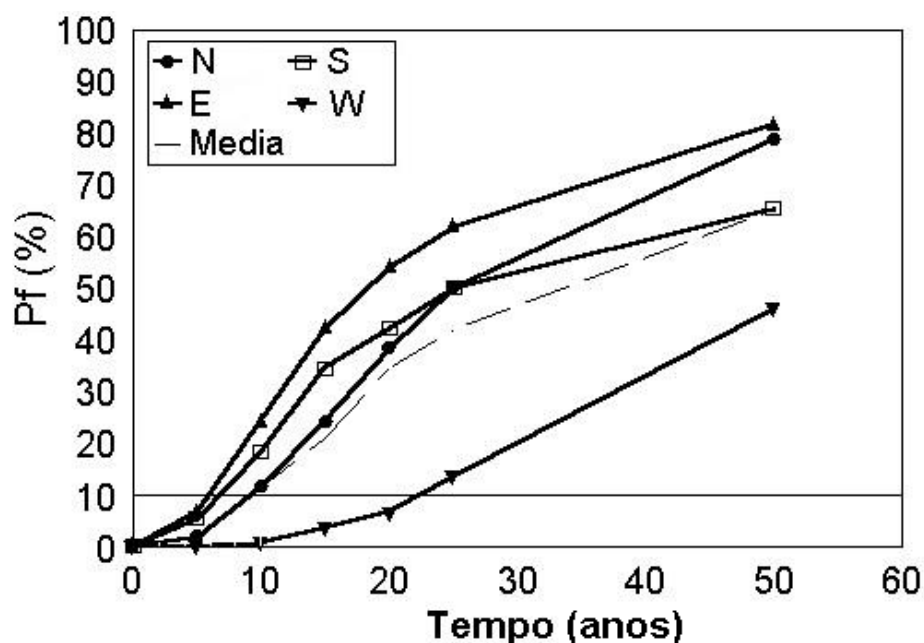


Figura 7- Evolução das curvas P_f .

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pelo exposto, os resultados encontrados conduzem à conclusão de que a variável orientação dos costados, tanto pela magnitude de μ_S como pelo valor de σ_S , apresenta uma influência importante na determinação do parâmetro P_f e, por conseguinte, na determinação do período correspondente à Vida Útil dos elementos estruturais investigados.

Para a definição dos períodos de iniciação e de propagação do processo de deterioração, se considera apropriada a utilização de propostas probabilísticas para a determinação do período até a despassivação das armaduras. Para o ambiente em questão, devido às elevadas velocidades do processo de corrosão, se recomenda considerar que a partir da despassivação das armaduras a estrutura se encontre no período correspondente à sua vida residual.

A utilização de curvas para a análise da evolução de P_f , onde se definam as zonas de maior e menor agressividade ambiental, representa possível alternativa a utilizar-se em estudos de otimização de sistemas de manutenção de estruturas *offshore*.

REFERÊNCIAS

- 1- PEREIRA, A.C. **Estudio de Métodos Probabilísticos para la Predicción de la Vida Útil de Estructuras de Hormigón: Importancia del Factor Variabilidad Espacial en el Caso de Plataformas Offshore en Brasil**. UPM, Tese de Doutorado, Madri-Espanha, 2003.
- 2- IZQUIERDO LÓPEZ, D. **Bases de Diseño para un Tratamiento Probabilista de los Procesos de Corrosión de la Armadura en el Hormigón**. UPM, CSIC / ICCET, Tese de Doutorado, Madrid - Espanha, 2002.

- 3- DNV. **Informes Técnicos: Construção das Plataformas PUB-02, PUB-03 y PAG-02.** Det Norsk Veritas / Petrobrás. Brasil, 1976-1977-1978.
- 4- DNV. **Plano de Inspeção em Serviço da Plataforma de Concreto PAG-02.** Informe Técnico Det Norsk Veritas. (Report nº 450-001/87). Petrobrás. Brasil, 1987.
- 5- PETROBRÁS. **Informes Técnicos: Inspeção das Plataformas PUB-02 e PAG-02,** 1984-1988.
- 6- BRITE EuRam Project BE95-1347. **Statistical Quantification, Onset of Corrosion: Report,** 1998.
- 7- BRITE EuRam II. **Probabilistic Methods for Durability Design.** DURACRETE: Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures, 1999.
- 8- HELLAND, S. Basis of Design: Structural and Service Life Design. A Common Approach. **Third Workshop: Service Life Design of Concrete Structures: From Theory to Standardisation,** DURANET, 2001.