

# CAUSAS E CONSEQUÊNCIAS DO EFEITO DA CORROSÃO EM ESTRUTURAS OFFSHORE DE PETRÓLEO: ESTUDO DE REVISÃO

## GICELIA MOREIRA

Doutoranda em Eng. Química da Universidade Federal de Campina Grande- UFCG, gicelia.moreira@eq.ufcg.edu.br

## RESUMO

No Brasil, com a exploração de petróleo em águas profundas a utilização de tubos flexíveis em sistemas de produção tem um aumento significativo. As plataformas offshore usadas para perfuração e produção de petróleo podem sofrer falhas em sua estrutura devido à corrosão. Uma das principais causas de decadência em estruturas offshore de petróleo é a corrosão. A corrosão de uma forma geral é considerada muito perigosa, principalmente quando se trata de oleodutos marítimos e risers de transporte de petróleo. Tais fatos são oriundos da instalação ou durante a operação ou até mesmo contatos com outros risers quando se tem um curto espaço de instalação. A vida útil de um determinado material lançado ao mar pode fazer com que o mesmo tenha falhas em suas estruturas, gerando vazamentos de fluido, por exemplo, petróleo e conseqüentemente causando grandes danos ao meio ambiente e também a perda de vidas. Por menor que seja a perda do material em uma estrutura offshore a mesma pode gerar grandes catástrofe. Diante disto, o presente estudo tem por objetivo um estudo de revisão de problemas e fenômenos do efeito da corrosão de componentes estruturais metálicos utilizados em tubos flexíveis de produção de óleo de campos offshore. São analisadas causas e conseqüências do fenômeno de corrosão no que no que diz respeito a possíveis falhas estruturais e suas respectivas gravidades em risers de petróleo offshore.

**Palavras-chave:** Corrosão, Risers, Flexíveis, *Offshore*, Petróleo.

## INTRODUÇÃO

Com a descoberta do Petróleo, com o grande avanço do desenvolvimento tecnológico, o uso de seus derivados em vários setores da indústria tem movimentado a economia e a política dos países produtores e/ou importadores. Com o aumento dos derivados do petróleo faz-se com que se tenha um grande avanço nos projetos de pesquisa e de equipamentos, podendo ser destacado o desenvolvimento de tubos flexíveis de produção de óleo de campos offshore. [1] afirma que, com o aumento da lâmina d'água, aumentou a necessidade do desenvolvimento de projetos de novos dutos que sejam capazes de trabalhar em tais condições de operação. Dessa forma, surgiram os dutos flexíveis que são compostos por várias camadas de diferentes materiais, sendo lançados no mercado offshore e ganhando espaço em toda indústria a nível mundial. Estão também presente na maioria das plataformas de produção e exploração offshore, conexões e interligações submarinas de escoamento de petróleo [2].

De acordo com [3] mesmo com todo o processo tecnológico de projeto de fabricação de risers, os mesmos estão sujeitos a falhas que podem surgir na fase de desenvolvimento do próprio produto, na escolha do material, fabricação, montagem e até mesmo na instalação e operação dos mesmos. Os flexíveis, por exemplo, por operarem em ambiente offshore, estão submetidos constantemente aos efeitos químicos da água do mar e de outros componentes químicos que acompanham o petróleo durante todo o processo de produção.

Um outro fator a ser destacado em relação aos risers flexíveis são as condições ambientais onde o flexível se encontra instalado, as cargas estáticas devidas ao próprio peso do riser, a pressão da coluna de água a qual se encontra como também as cargas dinâmicas resultantes das correntes marítimas e dos movimentos das unidades flutuantes. Todos esses efeitos tendem a causar rupturas nas armaduras de tração devido a falhas por fadiga-corrosão, o que pode gerar grandes prejuízos nas empresas de produção offshore como também danos graves ao meio ambiente de uma forma geral.

Todos os cuidados são necessários, pois são muitos os riscos com relação a integridade das pessoas, a contaminação do meio ambiente e prejuízos financeiros, fazendo com que o gerenciamento da corrosão seja um ponto capital de acordo com a confiabilidade de equipamentos e instalações adotados na produção offshore de petróleo.

Estruturas offshore de longo tempo de vida precisam de avaliações para detectar possíveis sinais de corrosão em seus componentes estruturais. Logo, por meios dessas avaliações são mostrados resultados do tipo de corrosão e também se a mesma é aceitável ou não. Diante disto, torna-se necessário um modelo em que diferentes parâmetros sejam sugeridos para que se possa descrever a resistência do material corroído, por exemplo: espessura média, mínimo de espessura, rugosidade da superfície e alteração dos parâmetros mecânicos dependentes da degradação e da superfície [4-7].

O efeito da corrosão é definido como a degradação de um determinado material em consequência de reação química e eletroquímica com o ambiente no qual se encontra [8,9]. Porém, conforme o tempo de operação das estruturas, a resistência do material tende a diminuir em consequência da perda de espessura gerado pela corrosão. A corrosão pode levar a falhas estruturais se não for prevista a tempo e se todas as ações de gerenciamento não forem adotadas. Então, danos causados por corrosão são considerados mais prejudicial em indústrias de produção offshore, em consequência do alto nível de salinidade e agentes corrosivos agressivos na água do oceano [10,11].

Na fabricação de oleodutos, material de alta resistência como aço (High Speed Steel) tem sido usada de maneira muito significativa na produção offshore. Os dutos feitos de HSS podem sofrer corrosão externa, sendo uma ameaça aos movimentos à integridade dos sistemas de oleodutos usados nas indústrias petróleo [12].

Segundo [13] a corrosão por pipe por ser extremamente localizada a geração de pequenos furos no metal é considerada uma forma difundida e insidiosa em relação a todos os tipos de corrosão causado em estruturas offshore. [12] afirma que o comportamento de corrosão por pite de SSS pode apresentar comportamento em relação a outros materiais mesmo que seja em um ambiente semelhante.

## **DESCRIÇÃO DO PROBLEMA**

A Petrobras tem realizado grandes investimentos em pesquisas de produção offshore, podendo ser citado como exemplo o Programa Tecnológico de Águas Ultraprofundas, criado no ano de 2000 pela Petrobras para conseguir a auto-suficiência na produção de petróleo [14]. Vencer desafios de produção em grande profundidade exige desenvolvimentos tecnológicos

e científicos. Diante disto, a necessidade de perfuração de petróleo em águas de lâmina d'água profunda e ultra-profunda está relacionada a altos investimentos em projetos, surgindo daí uma grande motivação de estudos relacionados a análise de risers de produção offshore.

Ao longo da vida útil de um riser, os mesmos estão sujeitos a falhas em suas estruturas, gerando corrosão e podendo afetar a sua integridade. Como pode ser observado (**Fig. 1**) de forma periódica, os risers são desmontados e suas juntas inspecionadas. O efeito da corrosão causa perda de espessura do material em risers sendo mais prejudicial em risers da plataforma P23 [14].

Figura 1: (a, b, c) Defeito de corrosão



Fonte: Benjamim et al., 2005.

De acordo com [15] a ausência de critérios de aceitação que provoca a perda da espessura causada pela corrosão nas normas internacionais, tem-se uma recomendação por parte do fabricante que juntas com perda de 12,5% de espessura nominal sejam substituídas.

A grande maioria dos dados de corrosão disponíveis na literatura para engenheiros acaba sendo cotado em termos de uma taxa de corrosão, apesar das considerações de que a corrosão deve diminuir com o tempo [16,17]. As tentativas iniciais para explicar a não linearidade conhecida foram revisadas, mas, só posteriormente foi realizada uma tentativa de desenvolver modelos de engenharia com base nos princípios da ciência da corrosão [18-20].

Diante do exposto, o presente artigo tem por objetivo estudar problemas e fenômenos do efeito da corrosão de componentes estruturais metálicos utilizados em tubos flexíveis de produção de óleo de campos offshore.

## FUNDAMENTAÇÃO CIENTÍFICA

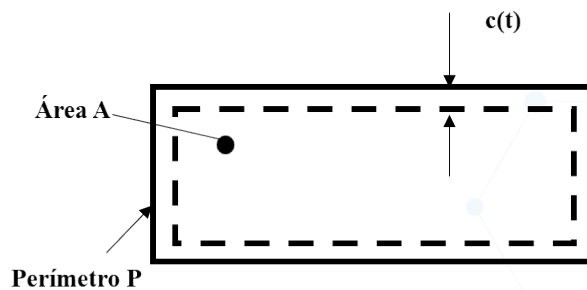
Uma das principais causas de falhas em equipamentos e tubulações de plataformas offshore de produção de petróleo é a corrosão. Tais falhas

acabam prejudicando o processo e atrasando todo o cronograma operacional de produção gerando altos custos de manutenção. Como a maioria dos equipamentos (dutos e risers) de plataformas de produção offshore a maioria é composta de aço (em geral, aço carbono), isso faz com que a indústria de petróleo esteja sempre convivendo com as causas e consequências dos processos de corrosão [21]. Muitas são as pesquisas e investimentos nesta área de estudo tentando minimizar tais efeitos.

Com objetivo de explorar o efeito da corrosão por pite em tubulações offshore de petróleo, [22] realizaram através do Método de Elementos Finitos uma análise estrutural para um modelo de juntas K-T de uma perna de plataforma jack-up. Geralmente, a capacidade estrutural depende principalmente das dimensões da seção transversal de um membro estrutural, como pode ser observado na **(Fig. 2)**, para um membro axial de seção transversal de área ( $A$ ) sob tensão axial e imersa em água do mar [23]. Devido aos efeitos da corrosão a resistência estrutural pode ser diminuída, podendo ser representada pela seguinte equação:

$$R(t) = \sigma[A - P.c(t)] \quad (1)$$

**Figura 2:** Seção transversal de uma barra sob tensão axial mostrando perda de corrosão



Fonte: Melchers (2005).

Onde  $c(t)$  é a perda de dimensão por corrosão em função do tempo e  $P$  é comprimento do perímetro exposta à água do mar. No modelo analisado adotou-se as seguintes considerações:

- O modelo é submetido a uma carga uniforme atuando na linha central do eixo vertical, sofrendo corrosão aleatória por pite aleatória em material de soldagem e em membros de aço com a mesma profundidade;

- A profundidade de corrosão inicial é de 1 mm e aumenta com o tempo sendo sujeito a corrosão por pite aleatória, selecionando modelos aleatórios ao longo da soldagem do material de aço e os elementos devem ter uma redução em espessura equivalente à quantidade de corrosão por pite variando com o tempo;
- O modelo está sofrendo corrosão uniforme em material de soldagem e membros de aço com corrosão (1 mm / ano), onde a vida útil varia de zero a 10 anos.

Inicialmente, os autores analisaram a corrosão por pite em material de soldagem onde foi observado que a corrosão por pite aleatória ocorre no material de soldagem, enquanto o material de aço permanece intacto. Em um segundo momento, observou-se a corrosão por pite em membros estruturais de aço mostrando que o material de soldagem também permanece intacto. Posteriormente, para a análise do efeito da corrosão uniforme no material de soldagem, os resultados mostraram que o material de aço permanece sem nenhum tipo de dano já para a corrosão uniforme em membros estruturais de aço observou-se que a corrosão ocorre nos membros de aço sem nenhum dano ao material de soldagem.

Com isso, os autores concluíram que a mudança na capacidade da junta devido a corrosão por pite de material de soldagem e aço é maior do que devido a corrosão uniforme do material de soldagem e membros de aço; a corrosão por pite tem pouco efeito significativo sobre a capacidade de resistência da estrutura; a profundidade de pite aumenta com o aumento da temperatura média da água do mar, a concentração de SRB tem um efeito significativo sobre a profundidade de corrosão podendo, ser eliminado por pintura.

Trincas por corrosão e fadiga são as principais ameaças à integridade estrutural de plataformas offshore envelhecidas. Com objetivo de estimar os níveis de segurança das estruturas, uma abordagem de avaliação para o envelhecimento de plataforma offshore devido aos efeitos da corrosão e fissuras de fadiga são apresentados por [24].

Os efeitos da corrosão e trincas por fadiga na estrutura e a capacidade de cisalhamento do material base variando com o tempo são levados em consideração para avaliar o índice de confiabilidade de plataformas offshore. O trabalho citado, considera a forma mais encontrada de corrosão em aços leves e de baixa liga (corrosão uniforme), onde, a perda do material



da estrutura é relativamente uniforme. A corrosão minimiza a capacidade de resistência a esforços de cisalhamento, reduzindo a espessura dos membros. Onde o modelo estudado por [24] é baseado no modelo não linear adotado por [25], sendo dado pela equação (2):

$$\begin{aligned} t_r(t) &= C_1 T_e^{C_2} \\ r_r(t) &= C_1 C_2 T_e^{C_2-1} \end{aligned} \quad (2)$$

onde  $t_r(t)$  é a profundidade de corrosão para perda de espessura devido à corrosão em mm;  $r_r(t)$  é a taxa de corrosão em mm/ano,  $T_e$  é o tempo de exposição em anos após a quebra de revestimento que é considerado como  $T_e = T - T_c - T_t$ . Como  $T$  é a idade da plataforma em anos  $T_c$  é a vida do revestimento em anos e  $T_t$  é a duração da transição em anos que pode ser tomado como 0,  $C_1$  e  $C_2$  são coeficientes a serem determinados pela análise estatística de dados de medição de corrosão. Com base em [26] o desvio padrão do modelo linear pode ser escrito da seguinte forma:

$$\sigma_d = C_3 u_d(t) \quad (3)$$

O termo  $C_3$  é um coeficiente a ser determinado pela análise estatística de dados de medição de corrosão,  $u_d(t)$  é o valor médio a qualquer momento. Os autores afirmam que a função de distribuição de probabilidade da profundidade de corrosão é aproximada pela distribuição normal ou distribuição lognormal de acordo com os diferentes estados de corrosão. Os autores observaram que trincas de corrosão e fadiga que enfraquecem a capacidade das plataformas offshore são consideradas como variáveis aleatórias dependentes do tempo.

Estudos sobre a detecção de corrosão em estruturas offshore usando ondas ultrassônicas guiadas foi avaliado por [27]. De acordo com os autores, os risers que conectam os dutos ao leito do mar com a tubulação de processamento na plataforma de produção apresentam desafios específicos para ensaios não destrutivos. Os risers são considerados como uma parte crítica do sistema de produção, sendo sujeitos a inspeções como a possibilidade não apenas de corrosão interna e erosão, como também corrosão externa e erosão causada pelos efeitos da água do mar com correntes e efeitos de onda.

A inspeção visual provavelmente detectará corrosão associada a danos aos revestimentos de proteção do riser. Porém, para detectar tais danos

sob os revestimentos e na superfície interna do riser Técnicas de NDT (Non Destructive Tests) são necessárias. Sob acesso externo ao riser, corrosão e erosão em seu interior podem ser detectados usando ultrassom pulso-eco.

Métodos ultrassônicos de pulso-eco não podem ser aplicados através de revestimento [27]. Avaliação com inspeção e manutenção de tubos flexíveis indicam que as principais causas de falhas são rupturas do fio da armadura causada pela fadiga na na região de conexão de topo, **Fig. 3a** [28].

Segundo [29] contatos entre o riser e a plataforma ou outro riser são detectados com frequência, principalmente em unidades de baixa lâmina d'água devido a deslocamentos da plataforma **Fig. 3b**.

**Figura 3:** (a) Danos causados pelo contato com uma braçadeira de plataforma; (b) Ruptura do fio da armadura



(a)



(b)

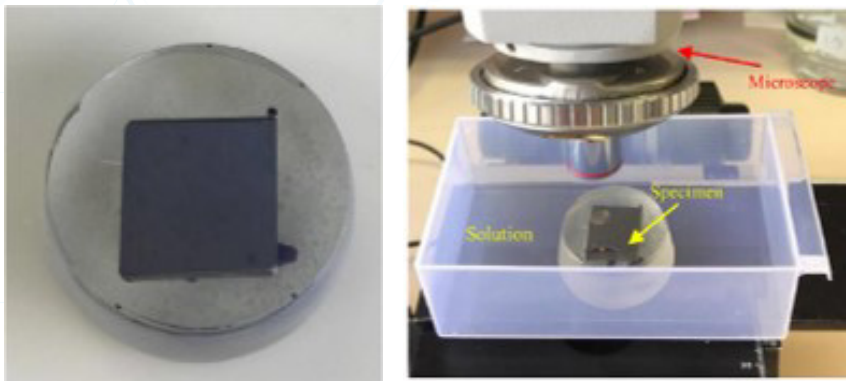
Fonte: Marinho et al., 2006.

De acordo com [30] o modelo de progressão de corrosão mais antigo é provavelmente o linear com uma taxa de corrosão fixa dependendo do ambiente. Devido à sua simplicidade, ainda é o modelo mais comumente usados entre engenheiros sendo razoável para intervalos de tempo mais curtos. Em seus estudos, os autores avaliaram modelos corrosivos em vários ambientes marinhos. Caso ambientes homogêneos distintos possam ser identificados, esta abordagem de modelagem pode ser aplicada separadamente para cada ambiente garantindo tratamento diferenciado de diferentes fenômenos de corrosão em cada ambiente analisado. A progressão temporal da distribuição da corrosão permite previsões de curto prazo que são calibradas para estruturas específicas e meio ambiente, auxiliando no planejamento de inspeção e manutenção bem como avaliação estrutural de uma condição futura provável.



[31] estudaram por meio de testes experimentais os danos da corrosão por pite do aço X80 em ambiente marinho usando soluções de NaCl e um modelo que prevê a situação futura das estruturas. As espécies adotadas foram limpas com água destilada e secos ao ar livre, para que se pudesse assegurar a geração de poços insidiosos na amostra aumentando a chance de detectar a degradação do material. Uma das amostras testadas pode ser observada na **Fig. 4a** e a configuração do experimento na **Fig. 4b**.

**Figura 4:** (a) Amostra em molde de resina epóxi e superfície acabada, (b) Configuração experimental.



Fonte: Arzaghi et al., 2020.

Um modelo de lei de potência referenciado por [32] é adotado para descrever a duração aleatória e a não linearidade do processo de corrosão. A taxa de função é dada pela equação:

$$\lambda(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left( \frac{t}{\beta} \right)^{\alpha-1} \quad (4)$$

Os autores sugerem que a função apropriada considerando a suposição da lei de potência possa ser determinada pela Equação (5):

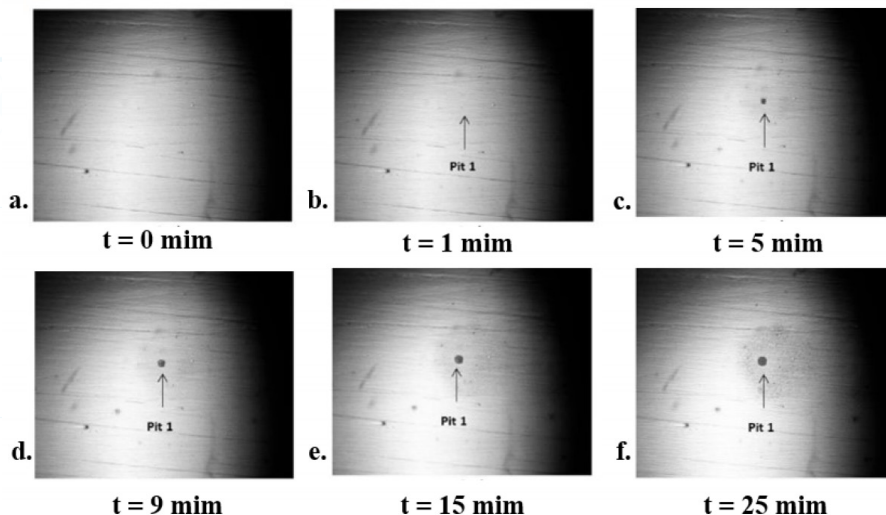
$$f(t_i | t_{i-1}) = f(t_i | T_i > t_{i-1}) = \frac{f(t_i)}{\Pr(T_i > t_{i-1})}, i = 2, \dots, n \quad (5)$$

onde  $T_i$  é o tempo de observação do tamanho da cava do experimento.

O processo de corrosão por pite observado em uma das amostras X80 durante o teste in situ é ilustrado na **Fig. 5**. A condição inicial da superfície

da amostra imediatamente após a imersão mostrada na **Fig. 5a**. Alguns arranhões e defeitos menores podem ser vistos na superfície da amostra embora ela tenha sido polida em espelho. A **Fig. 5** ilustra o início do poço um minuto após o início do experimento em um local próximo a um defeito.

**Figura 5:** Evolução temporal da corrosão por pite na amostra X80 em solução de NaCl a 10%.



**Fonte:** Arzaghi et al., 2020.

De acordo com afirmações de [33], a rugosidade da superfície tende a afetar o comportamento do pite e o início da corrosão por pite irá depender da condição da superfície do material. Nas cinco amostras que foram polidas e usadas para desenvolver o experimento, foi possível observar que na maioria das pontuações iniciais a partir dos defeitos, observou-se que a extensão da diferença no acabamento superficial manteve-se consistente em todas as amostras apresentadas. Podem ser observados nas **Figs. 5c a 5f** a representação da propagação dos efeitos durante o experimento. Confirmando o crescimento constante nos minutos iniciais e decaindo com do tempo de propagação. Os resultados afirmam que mais de 70% das covas atingiram 0,01 mm de tamanho da cova em um tempo de exposição de 2 minutos.

Com intuito de analisar as propriedades do óleo na corrosão de água doce, [34] mostraram uma tentativa de análise por meio do uso da dinâmica dos fluidos computacional. De acordo com [35] estudos experimentais mostram que para frações de água entre 40% e 99% pode ser observado um

umedecimento com intervalos de tempo sendo possível verificar que o óleo e a água podem molhar a parede de forma alternativa. [34] conclui que a taxa de corrosão para umedecimento em intervalos de tempo é significativamente menor em comparação com a água e, portanto, o risco de corrosão não pode ser descartado. Os resultados indicaram que conforme a viscosidade do óleo aumenta, tem-se uma probabilidade de umedecimento com água e diminuição do risco de corrosão. Para um aumento na fração de água, um corte na fração de água na parte inferior do tubo cresce fazendo com que aumente o risco de corrosão.

[36] descreve em seu trabalho conceitos básicos e abordagens em estruturas variantes no tempo de análise de confiabilidade e sua aplicação na avaliação de risco de engenharia. Neste estudo, foi confinado à corrosão por imersão marinha de aço estrutural tanto corrosão geral quanto corrosão por pite. O autor afirma que a atenção é voltada para uma descrição de modelos probabilísticos e fenomenológicos para perda total devido a corrosão e por corrosão. Porém, para ilustrar os conceitos envolvidos, um exemplo de aplicação simples para corrosão por pite de uma tubulação mostra o aumento da tendência na probabilidade de falha com o tempo de exposição. De acordo com Melchers, em sistemas estruturais, plataformas offshore, dutos e navios, geralmente há dois critérios de projeto críticos: capacidade de resistência e integridade. O primeiro é essencialmente uma função da quantidade de perda de material devido à superfície ou corrosão. O segundo é essencialmente localizado devido à corrosão por pite.

Normalmente, a capacidade estrutural depende principalmente das dimensões da seção transversal de um membro estrutural. Por exemplo, para um membro axial da área de seção transversal  $A$  sob tensão axial  $r$  e rodeado por água do mar, a capacidade é dada por (Fig. 6a).

$$R(t) = \sigma[A - P \cdot c(t)] \quad (6)$$

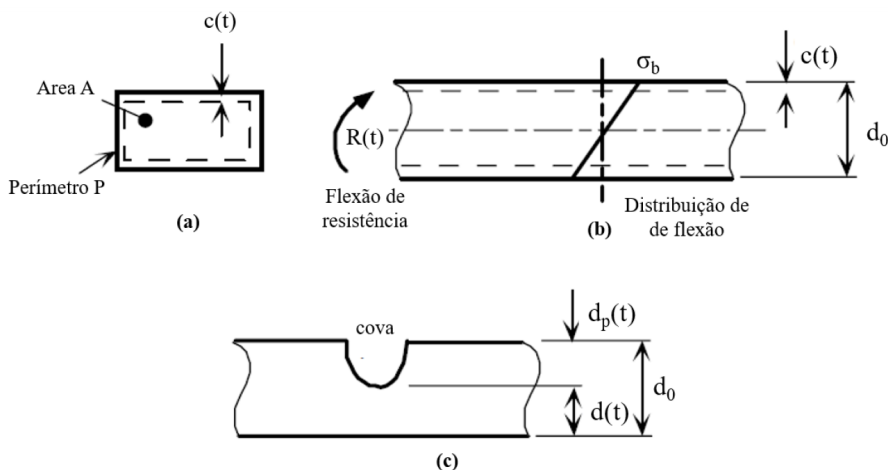
onde  $c(t)$  é a perda de corrosão em função do tempo e  $P$  é a área do perímetro exposta para a água do mar. Para placas em flexão com possibilidade de corrosão em cada lado da placa, a resistência à flexão é expressa por:

$$R(t) = k \cdot \sigma_b \cdot [d(t)]^2 = k \cdot \sigma_b \cdot [d_0 - 2 \cdot c(t)]^2 \quad (7)$$

onde  $b$  é a tensão máxima (fibra extrema) imposta pela ação de flexão,  $d(t)$  é a espessura restante e a espessura inicial da placa é dada por  $k = 0,25$

para material plástico (ou seja, dúctil) e 0,167 para resposta elástica (ou seja, quebradiça) (**Fig. 6b**).

Figura 6: (a) Seção transversal de uma barra sob tensão axial mostrando a perda de corrosão, (b) seção transversal de uma placa sob tensão de flexão mostrando o efeito da corrosão e (c) seção transversal de uma placa sujeita a corrosão de um lado.



Fonte: Melchers, 2005.

Para a corrosão, a espessura restante  $d(t)$  de uma placa de espessura inicial equação (8) como pode ser observado na **Fig. 6c**.

$$\lambda(t) = \frac{\alpha}{\beta} \left( \frac{t}{\beta} \right)^{\alpha-1} \quad (8)$$

onde  $d_p(t)$  é a profundidade máxima do poço no tempo  $t$ . A profundidade máxima do poço é necessária pois a primeira cova (mais profunda) causará a primeira perfuração, isso ocorre quando  $d(t) \rightarrow 0$ .

Para os sistemas estruturais, o autor afirma que a teoria de confiabilidade estrutural necessária para a avaliação dos riscos associados com infraestrutura corrosiva indicado para estes métodos para lidar adequadamente com estruturas em corrosão, modelos probabilísticos apropriados são necessários para descrever a perda de material devido à corrosão ou a profundidade de poços de produção.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, um estudo de revisão de problemas de corrosão de componentes estruturais metálicos utilizados em tubos flexíveis de produção de óleo de campos offshore bem como no cenário da engenharia foi realizado, a partir dos trabalhos analisados, conclui-se que:

1. A corrosão por pite tem pouco efeito significativo sobre a capacidade de resistência de estruturas offshore aumentando com o aumento da temperatura média da água do mar;
2. Nos níveis de segurança das estruturas de plataformas offshore devido aos efeitos de corrosão, a corrosão minimiza a capacidade de resistência a esforços de cisalhamento de componentes estruturais da plataforma reduzindo a espessura dos membros gerando enfraquecimento das plataformas offshore;
3. Como a detecção de corrosão em estruturas offshore usando ondas ultrassônicas os risers são considerados “sensíveis” quando se trata de sistemas de petróleo, sendo sujeitos tanto a corrosão como erosão, na sua parte interna e externa causado por ondas e corrente;
4. De testes experimentais da corrosão por pite do aço X80, observa-se que a diferença no acabamento superficial de mantém constante;
5. Na análise das propriedades do óleo na corrosão de água doce, à medida que a viscosidade do óleo aumenta o risco de corrosão diminui;
6. O efeito e estudo da corrosão em estruturas marítimos operacionais é de grande importância no âmbito da engenharia de uma forma geral, seja em tubulações e/ou risers de petróleo offshore podendo gerar altos custos financeiros e ambientais, quando é detectado em estruturas com elevado tempo de vida que não passa por operações de manutenção.

## AGRADECIMENTOS

A autora agradece ao laboratório de Mecânica offshore/LMO da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; a Universidade de São Paulo/USP; Universidade de Campinas/UNICAMP; Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ; Universidade de Tóquio/Japão, PETROBRAS, FAPESP, CNPq, CAPES e FINEP.



## REFERÊNCIAS

- [1] Camerini, M. G., 2012. Monitoramento de risers flexíveis através de técnica baseada em vibrações. Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica; 94 f.: il., Rio de Janeiro.
- [2] Simões, T. B., Braga, A. M. B., Morikawa, S. K, de, 2011. “Monitoramento de risers flexíveis com sensores a fibra óptica”, Tese de Mestrado da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- [3] Andrade, D. C., 2018. Corrosão-fadiga nas armaduras de tração de um riser flexível do tipo unbonded. Trabalho de Conclusão de Curso em de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas, 55f, Minas Gerais.
- [4] Garbatov, Y., Parunov, J., Kodvanj, J., Saad-Eldeen, S., and Soares, C. G., 2016. “Experimental assessment of tensile strength of corroded steel specimens subjected to sandblast and sandpaper cleaning”. *Marine Structures*, 49, pp. 18–30.
- [5] Islam, M. R., Sumi, Y., 2011. “Geometrical Effects of Pitting Corrosion on Strength and Deformability of Steel Rectangular Plates Subjected to Uniaxial Tension and Pure Bending”. *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers*, 14, pp. 9–17.
- [6] Appuhamy, J. M. R. S., Kaita, T., Ohga, M., Fujii, K, 2011. “Prediction of Residual Strength of Corroded Tensile Steel Plates”. *International Journal of Steel Structures*, 11(1), pp. 65–79.
- [7] Appuhamy, J. R. S., Ohga, M., Kaita, T., and Dissanayake, R, 2011. “Reduction of Ultimate Strength due to Corrosion -A Finite Element Computational Method”. *International Journal of Engineering*, 5(2), pp. 194–207.
- [8] Bhandari, J., Khan, F., Abbassi, R., Garaniya, V., Ojeda, R., 2015. Modelling of pittingcorrosion in marine and offshore steel structures – A technical review. *Journal ofLoss Prevention in the Process Industries* 37, 39–62, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2015.06.008>

- [9] Bhandari, J., Khan, F., Abbassi, R., Garaniya, V., Ojeda, R., 2017. Pitting degradation modeling of ocean steel structures using Bayesian network. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* 139 (5), 051402.
- [10] Arzaghi, E., Abaei, M.M., Abbassi, R., Garaniya, V., Binns, J., Chin, C., Khan, F., 2018. A hierarchical Bayesian approach to modelling fate and transport of oil released from subsea pipelines. *Process Safety and Environmental Protection* 118, 307–315.
- [11] Arzaghi, E., Abbassi, R., Garaniya, V., Binns, J., Chin, C., Khakzad, N., Reniers, G., 2018b. Developing a dynamic model for pitting and corrosion-fatigue damage of subsea pipelines. *Ocean Engineering* 150, 391–396, 2018b.
- [12] Wang, Y., Cheng, G., Li, Y., 2016. Observation of the pitting corrosion and uniform corrosion for X80 steel in 3.5 wt.% NaCl solutions using in-situ, and 3-D measuring microscope. *Corrosion Science* 111, 508–517.
- [13] Bhandari, J.; Khan, F., Abbassi, R.; Garaniya, V.; Ojeda, R., 2015. Modelling of pitting corrosion in marine and offshore steel structures – A technical review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 37, 39–62, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jlp.2015.06.008>.
- [14] Campello, G. C., 2007. Avaliação da vida residual de risers de perfuração corroídos. *Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro*, 171f.: Rio de Janeiro.
- [15] Benjamin, A. C., Cunha, D. J. S., Silva, R. C. C., Guerreiro, J. N. C. e Carneiro, E. G., 2005. Análise local do Riser da P23 com PITs de corrosão semi-esféricos, CT MC-30/2005, Petrobras/CENPES/PDP/MC, RJ, Brasil, (Relatório Interno Petrobras).
- [16] G. Kreysa, R. 1992. Eckermann, Dechema Corrosion Handbook, vol. 11, VCH Publishers, New York.
- [17] M. Schumacher (Ed.), 1979. *Seawater Corrosion Handbook*, Noyes Data Corporation, New Jersey.

- [18] R.E. Melchers, 2003. Modeling of marine immersion corrosion for mild and low alloy steels—Part 1: Phenomenological model, *Corrosion (NACE)* 59 (4)319–334.
- [19] R.E. Melchers, 2003. Modeling of marine immersion corrosion for mild and low alloy steels—Part 2: Uncertainty estimation, *Corrosion (NACE)* 59 (4) 335–344.
- [20] R.E. Melchers, 2003. Mathematical modelling of the diffusion controlled phase in marine immersion corrosion of mild steel, *Corrosion Science* 45 (5) 923–940.
- [21] Moura, J. S.; Silva, M. D. F.; Miranda, P. P. O. P.; Ferro, Silva, J. S.; Silva, G.S. 2015. Corrosão: colunas de perfuração de poços de petróleo. *Ciências exatas e tecnológicas | Maceió | v. 3 | n.1 | p. 65-74 |*.
- [22] Abdel-Ghany, R.; Saad-Eldeen, S.; Leheta, H. 2008. The Effect of Pitting Corrosion on the Strength Capacity of Steel Offshore Structures. *Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering OMAE2008*. June 15-20, 2008, Estoril, Portugal.
- [23] Melchers., R.E,1999, “ Corrosion uncertainty modeling for steel structures”, *Journal of Constructional Steel Research*,vol.52, pp.3-19.
- [24] Chunyan, J.; Shanshan L. 2008. Structural reliability assessment of aging offshore platforms with corrosion and cracks. *Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. June 15-20, 2008, Estoril, Portugal.
- [25] Melchers., R.E,1999, “ Corrosion uncertainty modeling for steel structures”, *Journal of Constructional Steel Research*,vol.52,pp.3-19.
- [26] King, R.N., Stacey, A. and Sharp, J.V., 1996, ““A review of fatigue crack growth rates for offshore steels in air and seawater environments”, *Proc. 15th OMAE, ASME, Vol. III, pp. 341-348*.
- [27] Graham R. E.; Tat-Hean, G. 2007. Detection of Corrosion in Offshore Risers using Guided Ultrasonic Waves. *Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. June 10-15, 2007, San Diego, California, USA.

- [28] Souza, L. A. L.; Simões Filho, S.; Almeida, M. C. 2003. “Flexible Line Inspection Methodology Based on RBI”, Final Report of PETROBRAS Research & Development Project 600544, Brazil (in Portuguese).
- [29] Marinho, M. G.; Santos, J. M.; Carneval, R. O. 2006. Integrity assessment and repair techniques of flexible risers. 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering June 4-9, 2006, Hamburg, Germany.
- [30] Neumann, K. M.; Vardal, O. T.; Soren, E. 2018. Updatable Spatio-Temporal Probabilistic Corrosion Modeling For Offshore Structures. Proceedings of the ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. June 17-22, 2018, Madrid, Spain.
- [31] Arzaghia, E.; Chiab, B. H.; Abaeic, M. M.; Abbassid, R. 2020. Pitting corrosion modelling of X80 steel utilized in offshore petroleumpipelines. Process Safety and Environmental Protection 141 (2020) 135–139.
- [32] Kelly, D.L., Smith, C.L., 2009. Bayesian inference in probabilistic risk assessment— Thecurrent state of the art. Reliability Engineering & System Safety 94, 628–643, <http://dx.doi.org/10.1016/j.res.2008.07.002>
- [33] Wang, Y., Cheng, G., Li, Y., 2016. Observation of the pitting corrosion and uniform cor-rosion for X80 steel in 3.5 wt.% NaCl solutions using in-situ, and 3-D measuringmicroscope. Corrosion Science 111, 508–517.
- [34] Pouraria, H.; Seo, J. K.; Paik, J. K. 2016. CFD Simulation Of The Effect Of Different Oils On Water Wetting And Internal Corrosion Of Oil Pipelines. Proceedings of the ASME 2016 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. June 19-24, 2016, Busan, South Korea.
- [35] J. Cai, C. Li, Z. Tang, F. Ayello, S. Richter, S. Nestic, 2012. Experimental study of water wetting in oil-water two-phase flow-horizontal flow of model oil. Chem. Eng. Sci. 73, 334-344.
- [36] Melchers, R. E., 2005. The effect of corrosion on the structural reliability of steel offshore structures. R.E. Melchers / Corrosion Science 47 (2005) 2391–2410.