

ESTUDO QUALITATIVO DE PROCESSO DE CORROSÃO EM PERFIS DE ARMADURA DE TRAÇÃO DE RISERS*

Matheus Porto Trindade¹
Ihana Gabriela Conceição de Jesus²
Maycon Jhosevan dos Santos³
Eliana Midori Sussuchi⁴
Sandro Griza⁵

Resumo

Os dutos riser de camadas não-aderentes apresentam uma configuração multicamadas cada qual com funções distintas objetivando garantir a integridade do processo de elevação de petróleo desde o leito oceânico. Este estudo tem o intuito de avaliar de forma qualitativa a susceptibilidade a corrosão do material das armaduras de tração. Para tanto, foram realizados ensaios de análise química, microdureza e rugosidade seguidos de um comparativo entre ensaios de corrosão por imersão e corrosão eletroquímica. Como uma forma de analisar a ocorrência de corrosão por frestas associada a corrosão sob tensão, foram realizados ensaios de flexão em três pontos emulando a configuração de camadas sobrepostas deslizantes (capa externa polimérica do riser) com permeabilidade ao meio externo (água oceânica).

Palavras-chave: Risers, Corrosão por frestas, Armadura de tração, Corrosão sob tensão

QUALITATIVE STUDY OF CORROSION PROCESS IN RISER TENSILE ARMOUR WIRES

Abstract

The non-adherent layer riser ducts have a multilayer configuration each with distinct functions aiming to guarantee the integrity of the oil lifting process from the ocean floor. This study aims to qualitatively evaluate the susceptibility to corrosion of traction armature material. For that, tests of chemical analysis, microhardness and roughness were carried out followed by a comparison between immersion corrosion and electrochemical corrosion tests. As a way of analyzing the occurrence of crevice corrosion associated with stress corrosion, three-point bending tests were performed, emulating the configuration of sliding superimposed layers with permeability to the external medium (ocean water).

Keywords: Risers, Crevice corrosion, Tensile armour, Stress corrosion.

¹ Engenheiro Mecânico, Mestrando, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (P2CEM), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.

² Graduanda em Engenharia de Materiais, Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais (DCEM), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.

³ Técnico em Petróleo e Gás, Graduando em Engenharia de Produção, Departamento de Engenharia de Produção, Faculdade de Administração e Negócios de Sergipe, Aracaju, Sergipe Brasil.

⁴ Química, Doutora, Professora, Departamento de Química, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.

⁵ Engenheiro Mecânico, Doutor, Professor, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (P2CEM), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

A descoberta de reservas de combustíveis fósseis em pontos sujeitos a conjunturas de operação gradativamente agressivas apresenta um grande desafio particular à indústria energética, tratando-se da adaptação de todos os elementos envolvidos no processo de extração e logística. Dentre tais adversidades está a condução de petróleo bruto desde o subsolo oceânico até as plataformas por meio de dutos, empreitada tal que envolve o enfrentamento de condições extremamente adversas, haja vista a água oceânica - relacionada a severa aceleração da degradação de metais ferrosos, associada a tensionamentos decorrentes de instalação, operação e imersão dos dutos [1]. Dessa forma, faz-se necessário lançar mão de elementos cuidadosamente dimensionados e concebidos, pois além de suplantarem as condições operacionais advindas do fluido conduzido, devem suportar potenciais transtornos oriundos de parâmetros sobrecomuns de pressão, temperatura e composição do meio [2].

O desenvolvimento de dutos flexíveis para ascensão de petróleo (risers) visa oferecer suporte aos progressivamente complexos cenários de extração [3]. Os risers apresentam uma configuração multicomponente cujos materiais se alternam entre metais (aços ao carbono ou inoxidáveis) e termoplásticos (poliamida, PVDF ou PEAD) [4], objetivando a proteção e confiabilidade integral dos dutos quando em operação, como mostra a Figura 1.



Figura 1. Seção com componentes de riser e umbilical de camadas não aderentes. [4]

Dentre as diversas configurações de dutos riser empregadas, destaca-se o sistema de camadas não aderentes, empregadas em seções longas (de especial utilidade em leitos oceânicos ultraprofundos), permitindo o deslizamento entre camadas e garantindo um grau de liberdade sob ações funcionais, ou seja, maior integridade desde a instalação até a operação no meio oceânico [5].

Dentre os diversos subcomponentes dos risers de camadas não aderentes, pode-se destacar a armadura de tração. Sua função é basicamente assegurar ao duto resistência a esforços axiais e de torção normalmente submetidos ao componente durante a sua operação [2,6]. A armadura de tração trata-se de camadas de aço carbono de alta resistência sempre dispostas em pares de perfis retangulares trefilados, apresentando angulações entre 30° e 55° (configuração helicoidal) com relação ao eixo longitudinal e 90° entre si. Seu perfil apresenta caracteristicamente as dimensões de (15 x 6) mm, podendo diferir entre modelos por sua composição química e propriedades mecânicas alteradas por processos de conformação plástica [6].

As falhas sequenciais ou isoladas das camadas que permeiam a armadura de tração proporcionam os indesejados efeitos relacionados a operação em meio ácido (trinca

induzida por hidrogênio ou corrosão sob tensão) com a presença de água do mar, cuja penetração propicia a aceleração do processo corrosivo sob diversos mecanismos, dentre eles a corrosão generalizada e por pites [2,7].

Particularidades oriundas desses processos de degradação estão associadas a limitação do acesso do meio, no caso a água oceânica, a superfície metálica em virtude da sobreposição das camadas termoplásticas a armadura de tração, caracterizando o processo de corrosão por frestas. Tal mecanismo trata-se de uma subcategoria de corrosão por pites no qual se apresenta um gradiente de pH entre o meio em contato com a superfície metálica e o meio externo, ocasionando a depassivação da superfície metálica presente na fresta e conseqüente intensificação do processo corrosivo na abertura [7]. A maioria dos estudos relacionados a esses mecanismos está ligado a aços inoxidáveis sob meios aeróbicos, tornando pesquisas acerca de aços carbono em meios anaeróbicos particularmente interessantes [7,8].

O presente estudo visa caracterizar e distinguir a susceptibilidade a corrosão entre duas amostras distintas de perfis empregados em armaduras de tração de risers flexíveis, através de ensaios de análise química, microdureza, rugosidade e micrografia, além de ensaios voltados a estudo de processo corrosivo cujo meio trata-se de água oceânica substituta preparada conforme a norma ASTM 1141 [9]: corrosão de cupons por imersão em laboratório e ensaio eletroquímico com polarização de Tafel.

Paralelamente a esses experimentos, foi realizada a imersão de ambos os perfis de armadura de tração em água oceânica [9] com uma configuração de sobreposição de camadas polimérica e metálica tensionada até o valor de escoamento do material por meio de arranjo de flexão em três pontos, tornando possível uma avaliação qualitativa do processo de corrosão sob tensão associada a corrosão por frestas numa disposição semelhante a observada em operação.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Materiais e Métodos

Visando diferenciar dois perfis de armadura de tração - denominados arame 1 e arame 2, quanto a propriedades mecânicas, superficiais, microestruturais e a composição química, procederam-se ensaios preliminares de microdureza e rugosidade, microscopia ótica e espectrometria de emissão ótica.

A análise metalográfica por microscopia ótica foi utilizada para investigação microestrutural das amostras antes da realização dos ensaios de imersão em laboratório e eletroquímico, permitindo examinar o arranjo dos grãos após passar pelos processos de conformação mecânica a frio durante a fabricação dos perfis.

Precedente a cada rodada de ensaios, foram analisadas duas amostras de cada perfil de armadura, embutidas em baquelite em uma prensa de embutimento PRE-30Mi da Arotec. A preparação das amostras para o ensaio micrográfico envolveu o lixamento até #1200 em uma politriz/lixadeira semiautomática Aropol 2V-PU da Arotec, com posterior polimento por processo mecânico com utilização de pasta de diamante como agente polidor. Após o polimento, as amostras foram atacadas com solução reveladora de Nital a 2% por 1 s e submetidas a análise de microestrutura em microscópio ótico Axio Lab.A1 da Zeiss.

O procedimento de ensaio de microdureza foi realizado em microdurômetro Vickers Future Tech FM-800 com aplicação de carga de 1000 gf durante 15 s. Foram

realizadas dez medições de microdureza em cada perfil, aproveitando as amostras empregadas na microscopia ótica. A microdureza, ou dureza, associada a caracterização microestrutural contribui para identificar a liga e o processo de fabricação dos arames.

Em ambos os perfis foi realizada análise química em um espectrômetro de emissão ótica estacionário Foundry Master XPert Oxford como técnica analítica para determinação da composição elementar dos aços.

Amostras dos perfis também foram submetidas a análise de rugosidade a 0,5 mm/s em uma extensão de 4,8 mm em rugosímetro compacto SJ-410 da Mitutoyo, visando caracterizar superficialmente ambos os perfis, sendo realizadas dez medições para cada.

2.1.1 Ensaio de Corrosão por Imersão em Laboratório

Com o intuito de determinar a taxa de corrosão e avaliar qualitativamente o processo de corrosão por frestas de ambos os perfis, foram realizadas três modalidades de ensaios envolvendo imersão no meio corrosivo anteriormente mencionado, preparado conforme a norma ASTM D1141-98 (2013) [9] cuja composição é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição Química da Água Oceânica Substituta

Composto	Concentração (g/L)	Composto	Concentração (g/L)
NaCl	24,53	NaHCO ₃	0,201
MgCl ₂	5,20	KBr	0,101
Na ₂ SO ₄	4,09	H ₃ BO ₃	0,027
CaCl ₂	1,16	SrCl ₂	0,025
KCl	0,695	NaF	0,003

pH ajustado em 8.2.

Os perfis foram submetidos ao ensaio de corrosão por imersão em laboratório conforme os procedimentos previstos na norma ASTM G31-72 (2004) [10]. Preparou-se três cupons de cada perfil com dimensões de (26 x 15 x 6) mm cada, respeitando as proporções geométricas indicadas por norma [10], por meio do corte das amostras com o auxílio de uma cortadora metalográfica CFIII da Fortel.

Todas as peças foram lixadas manualmente #1200, recebendo gravações individuais para posterior diferenciação. Antes da imersão os cupons foram pesados em uma balança analítica de precisão FA2004C da Sum Yau.

Os cupons foram amarrados a um travessão imersos em um béquer contendo água oceânica substituta obedecendo a proporção entre solução e área superficial total, estabelecida como 0,2 mL/mm², conforme previsto em norma [10]. O ensaio foi realizado dentro de capela de exaustão de gases a temperatura e pressão ambientes, sem aeração ou agitação.

Os cupons permaneceram em imersão durante 21 dias, sendo novamente pesados após 168, 312 e 480 horas, obedecendo o mínimo de 150h de ensaios previstos por norma [10], para obtenção dos valores de perda de massa. Antes de cada pesagem, os corpos de prova foram decapados conforme a norma ASTM G1-03 (2017) [11]. De posse da área superficial total e da perda de massa de cada cupom, é possível obter os valores de taxa de corrosão, em mm/ano, por meio da (Equação 1) [10].

$$\frac{K \times W}{A \times T \times D} \quad (1)$$

onde K é uma constante para taxa de corrosão de valor $8,76 \times 10^4$ para a unidade em mm/ano, T é o tempo de exposição em horas, A é a área em cm^2 , W é a perda de massa em g após a limpeza da amostra já ensaiada e D é a densidade do material em g/cm^3 (para o aço carbono emprega-se $7,86 \text{ g/cm}^3$). Dispondo das taxas de corrosão de cada perfil, foi possível também categorizar qualitativamente a severidade da corrosão, de acordo com a norma NACE RP0775-2005 [12], mostrada na Tabela 2.

Tabela 2. Categorização qualitativa da taxa de corrosão em aço carbono para sistemas de produção de petróleo

Severidade	Taxa Média de Corrosão (mm/ano)
Baixa	<0,025
Moderada	0,025-0,12
Alta	0,13-0,25
Severa	>0,25

Simultaneamente ao ensaio de corrosão por imersão dos cupons, foi realizado um ensaio de corrosão por imersão dos perfis submetidos a totalidade da tensão de escoamento por meio de suportes em aço inoxidável para aplicação de flexão em três pontos, obedecendo os procedimentos previstos na norma ASTM G39 [13] de configurações de flexão para sistemas de tensão estática, conforme mostra a Figura 2.

Os corpos de prova de ambos os perfis foram cortados com comprimento de 150 mm sendo fletidos ou individualmente ou junto a uma camada de polietileno de alta densidade de dimensões análogas às do corpo de prova. A flecha sob três pontos equivalente a tensão de escoamento foi calculada de acordo com [13], sendo aplicada e mensurada com o auxílio de uma máquina de medir por coordenadas Crysta-Apex S 574 da Mitutoyo. A disposição dos corpos de prova é mostrada na Figura 3.

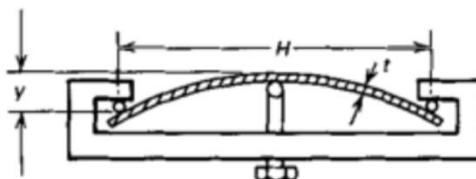


Figura 2. Configuração esquemática de corpo de prova e suporte para ensaio de flexão em três pontos. [12]



Figura 3. Disposição dos corpos de prova após aplicação de flecha.

Todos os perfis montados no suporte e submetidos a 100% da tensão de escoamento foram imersos em um recipiente contendo água oceânica substituta também obedecendo a proporção de 0,2 mL/mm² [10]. O ensaio se estendeu por 400 horas após as quais procedeu-se a avaliação dos processos de corrosão por pites, conforme estabelece a norma ASTM G 46-94 (2005) [14].

Tal investigação ocorreu por meio de subseqüentes inspeções visual e metalográfica, determinando a extensão e aparente localização dos pites. As inspeções ocorreram com auxílio de um microscópio ótico Axio Lab.A1 da Zeiss. Dessa forma, foi possível estabelecer comparativos de amostras não acabadas e após sofrerem lixamento até #800, permitindo observar o efeito qualitativos de corrosão sob tensão associada a corrosão por frestas nesse determinado sistema.

2.1.2 Ensaio eletroquímico

Visando obter parâmetro comparativo de susceptibilidade a corrosão dos perfis estudados, foi realizada a avaliação da taxa de corrosão por meio de técnica eletroquímica. Ambos os perfis foram cortados como cupons com dimensões semelhantes às peças ensaiadas por meio de corrosão por imersão e receberam acabamento em suas faces por meio de lixamento manual até granulação #600. Os ensaios ocorreram através do software Nova 2.1.3 ligado a um potenciostato Autolab PGSTAT100, utilizando a técnica de polarização de Tafel para avaliação da taxa de corrosão.

A área superficial de 0,57 cm² dos corpos de prova foi exposta em 20 mL solução de água oceânica substituta [9] em uma célula convencional de três eletrodos, na qual o eletrodo prata cloreto de prata saturado (Ag/AgCl) serviu de eletrodo de referência e como contra-eletrodo foi empregado fio de platina. O escaneamento foi realizado a uma taxa de 1 mV/s incrementando o potencial na direção positiva. Para cada perfil foi obtida uma triplicata e as taxas de corrosão desejadas, em mm/ano, foram determinadas pelo método de extrapolação.

2.2 Resultados e Discussão

2.2.1 Análise metalográfica

As micrografias dos arames 1 e 2 obtidas via microscopia ótica são mostradas nas Figuras 4 e 5. Em ambas amostras é possível visualizar estrutura severamente alongada - disposição característica de aços laminados a frio para fabricação de

perfis longos e esbeltos. Conforme esperado, é possível observar ferrita proeutetóide (em branco) combinada a perlitas (mais escuras), condição específica de aços hipoeutetóides.

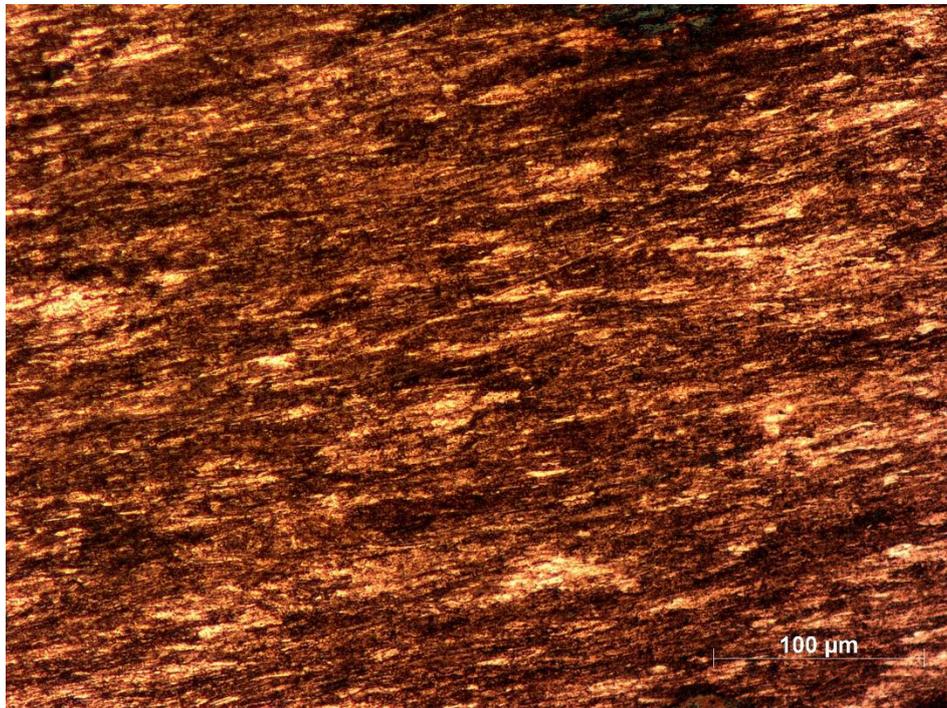


Figura 4. Micrografia do arame 1 obtida por microscopia ótica.

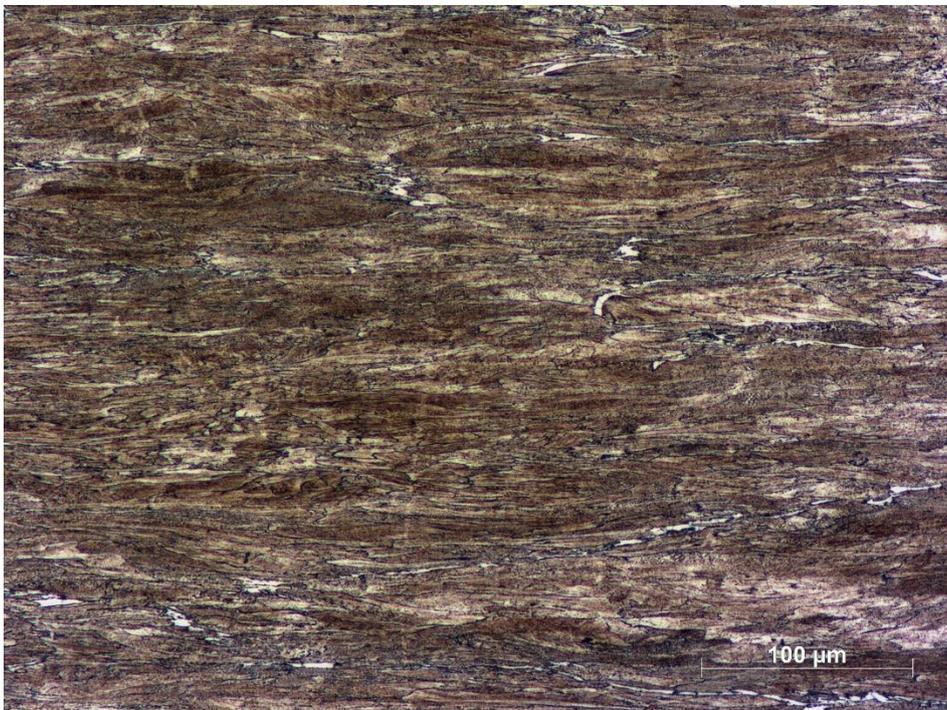


Figura 5. Micrografia do arame 2 obtida por microscopia ótica.

2.2.2 Ensaio de microdureza

Os valores de microdureza encontrados para cada perfil são mostrados na Tabela 3. Os resultados encontrados coincidem com valores próprios de processo de intensa deformação a frio aplicados a aços ao carbono.

Tabela 3. Microdureza Vickers média de cada perfil.

Perfil	Dureza (HV)
Arame 1	319,82 ± 2,82
Arame 2	367,04 ± 3,16

2.2.3 Análise química

Os resultados da análise química por espectrometria de emissão ótica são mostrados na Tabela 4. Ambos perfis apresentam composição química de aços carbono comerciais cujas composições expõem teores percentuais de manganês e percentuais residuais de outros elementos de liga [15].

Tabela 4. Análise química dos perfis em percentual da massa total

Perfil	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb
Arame 1	98,5	0,28	0,29	0,75	0,017	0,005	0,04	0,01	0,01	0,02	0,01
Arame 2	98,8	0,15	0,23	0,67	0,015	0,005	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01

2.2.4 Ensaio de rugosidade

As medidas de rugosidade superficial são expostas pela Tabela 5. Ambos perfis apresentaram valores de rugosidade características de perfis deformados a frio. O arame 1 apresentou rugosidade superficial própria de classe N5, inerente a aplicações de exigência máxima de qualidade superficial e de sujeição a alta pressão não desmontáveis. O arame 2 apresentou valores pertinentes a classe N6, de menor exigência superficial que a anterior, porém própria de superfícies expostas a elevados deslizamento e pressão, situação presenciada na montagem e operação de tubos riser de camadas não-aderentes [16].

Tabela 5. Rugosidade superficial dos perfis

Perfil	Rugosidade superficial (μm)
Arame 1	0,476 ± 0,046
Arame 2	1,186 ± 0,050

2.2.5 Ensaio de corrosão por imersão em laboratório

As perdas de massa e taxas de corrosão médias, acompanhadas de suas respectivas categorizações qualitativas quanto a taxa de corrosão de aços carbono são mostradas na Tabela 6. O aumento no tempo de imersão proporcionou sucessivos incrementos na taxa de corrosão média para ambos os perfis, podendo-se concluir que faz-se necessário um ensaio de imersão mais prolongado para que se possa convergir os valores de taxa de corrosão a patamares análogos aos encontrados nos ensaios eletroquímicos de polarização, discutidos posteriormente.

Tabela 6. Taxa de corrosão e categorização qualitativa conforme NACE RP0775-2005

Perfil	Tempo de imersão (h)	Perda de massa média (mg)	Taxa de corrosão média (mm/ano)	Categoria qualitativa de corrosão
Arame 1	168	5,8 ± 0,8	0,02973 ± 4,35x10 ⁻³	Moderada
	312	19,1 ± 2,2	0,05263 ± 5,47x10 ⁻³	Moderada
	480	30,7 ± 2,7	0,05503 ± 3,82x10 ⁻³	Moderada
Arame 2	168	5,6 ± 0,0	0,02798 ± 5,69x10 ⁻⁴	Moderada
	312	17,23 ± 0,7	0,04637 ± 2,17x10 ⁻³	Moderada
	480	30,3 ± 1,1	0,05291 ± 9,32x10 ⁻⁴	Moderada

2.2.6 Ensaio de corrosão por pites por imersão em amostra tensionada

Comparativos entre micrografias das regiões tensionadas dos arames ensaiados com aplicação de 100% da tensão de escoamento com e sem a configuração de fresta junto a uma camada de PEAD são mostradas nas Figuras 6 a 9. As Fig. 6 e 7 expõem amostras sem qualquer acabamento superficial, evidenciando uma considerável nucleação e crescimento de pites em regiões sujeitas à configuração de frestas.

É possível notar uma grande diferença entre as superfícies montadas e não montadas junto a camada de PEAD, nas quais o desenvolvimento de pontos de aeração diferencial e elevada concentração de íons depassivantes e/ou contribuintes para a queda pontual do pH leva a aceleração da formação, alargamento e aprofundamento desse processo de degradação.

As Figuras 8 e 9 apresentam as amostras após lixamento até #800 da região tensionada, visando tornar mais evidente a maior densidade de magnitude de pites oriundos de corrosão por frestas associada a corrosão sob tensão.

Considerando as elevadas profundidades para as quais os risers estão habilitados a trabalhar - cerca de 2000 m para dutos de Ø 6" ou 1500 m para Ø 9" [3], a notável nucleação de pites em condições normais de temperatura e pressão, combinada a taxas de corrosão definíveis como altas, faz-se necessário estudos de alterações dos mecanismos de corrosão em tais ligas de aço para armaduras de tração.

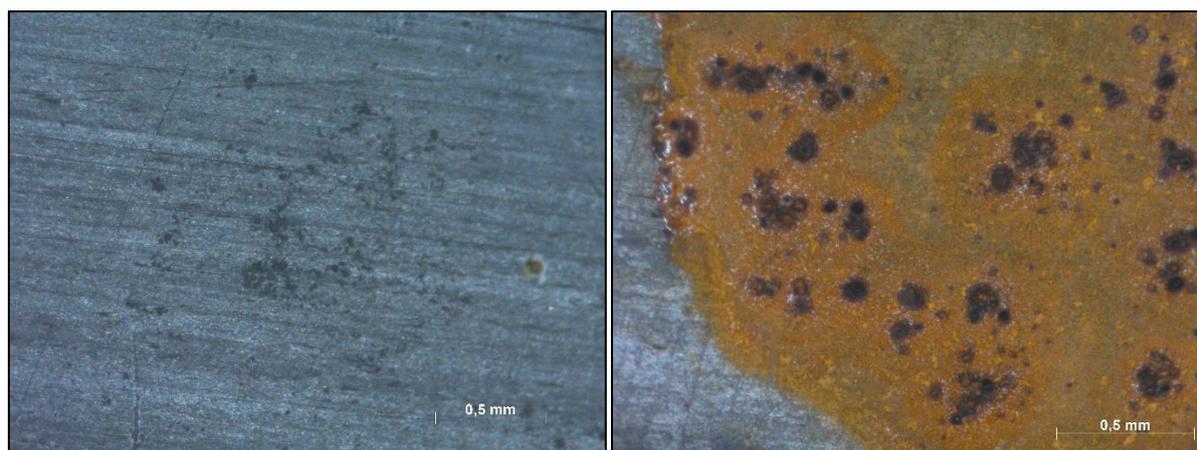


Figura 6. Comparativo de micrografias do arame 1 obtidas por microscopia ótica sem acabamento por lixamento. À esquerda: amostra imersa sem camada de PEAD; à direita: amostra imersa com camada de PEAD.

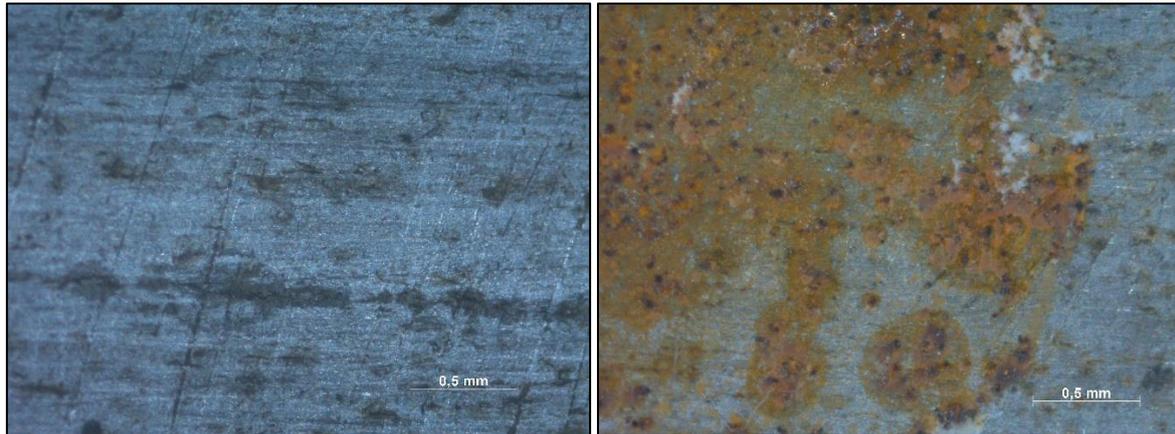


Figura 7. Comparativo de micrografias do arame 2 obtidas por microscopia ótica sem acabamento por lixamento. À esquerda: amostra imersa sem camada de PEAD; à direita: amostra imersa com camada de PEAD.

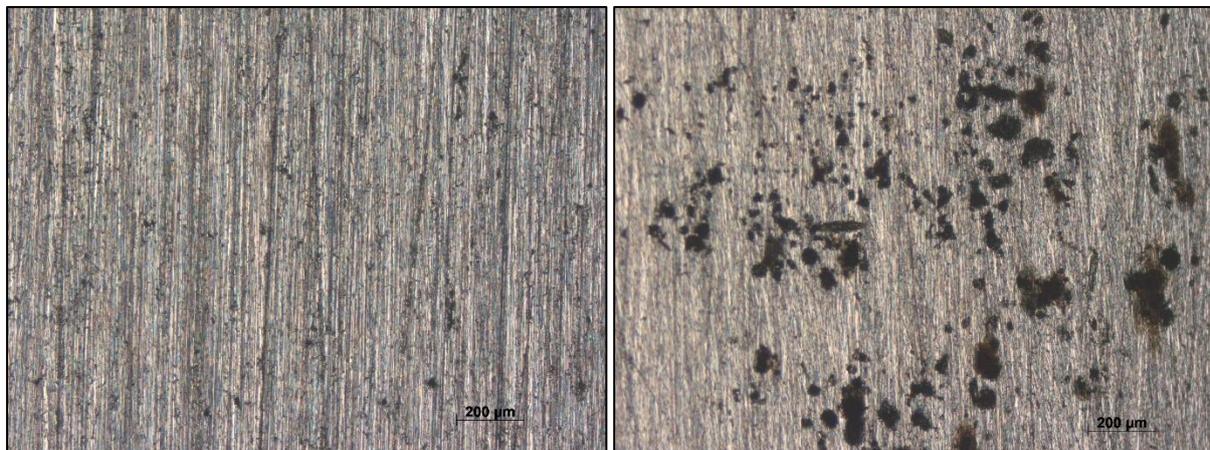


Figura 8. Comparativo de micrografias do arame 1 obtidas por microscopia ótica após acabamento por lixamento. À esquerda: amostra imersa sem camada de PEAD; à direita: amostra imersa com camada de PEAD.

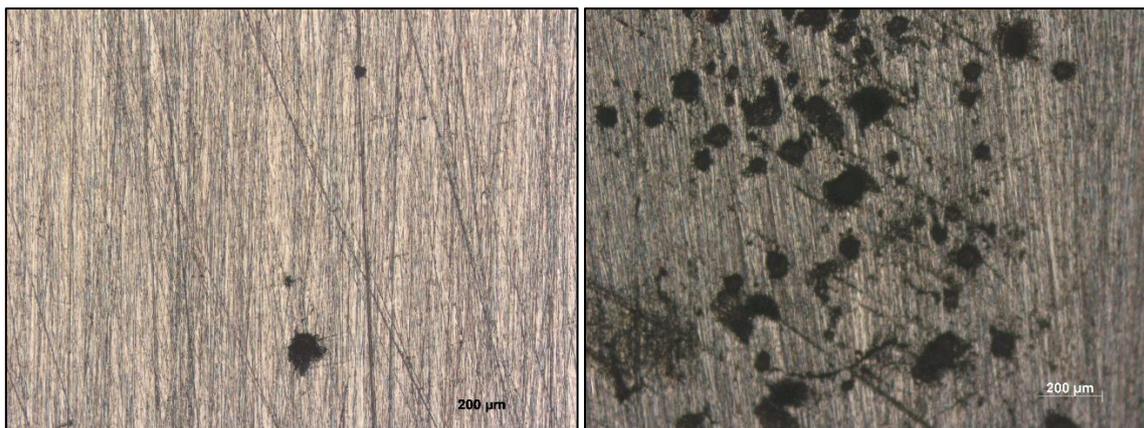


Figura 9. Comparativo de micrografias do arame 2 obtidas por microscopia ótica após acabamento por lixamento. À esquerda: amostra imersa sem camada de PEAD; à direita: amostra imersa com camada de PEAD.

2.2.7 Ensaio eletroquímico

Um comparativo entre os gráficos de Tafel dos perfis de arame 1 e 2 é mostrado na Figura 10 e os valores determinados pela técnica de extrapolação junto a sua classificação qualitativa de corrosão são expostos na Tabela 7.

Os resultados mostram um comportamento semelhante tanto para regiões catódicas quanto anódicas e uma baixa diferença entre os potenciais de corrosão, conforme a Tabela 6. A ausência de um potencial de pites para aços baixa liga e ao carbono, valor mínimo no qual os pites metaestáveis são capazes de se tornar estáveis [7] é presenciada em ambos os gráficos de polarização. Os valores de taxa de corrosão para ambos os perfis se enquadram no escalão de alto índice de corrosão para operações de exploração de petróleo.

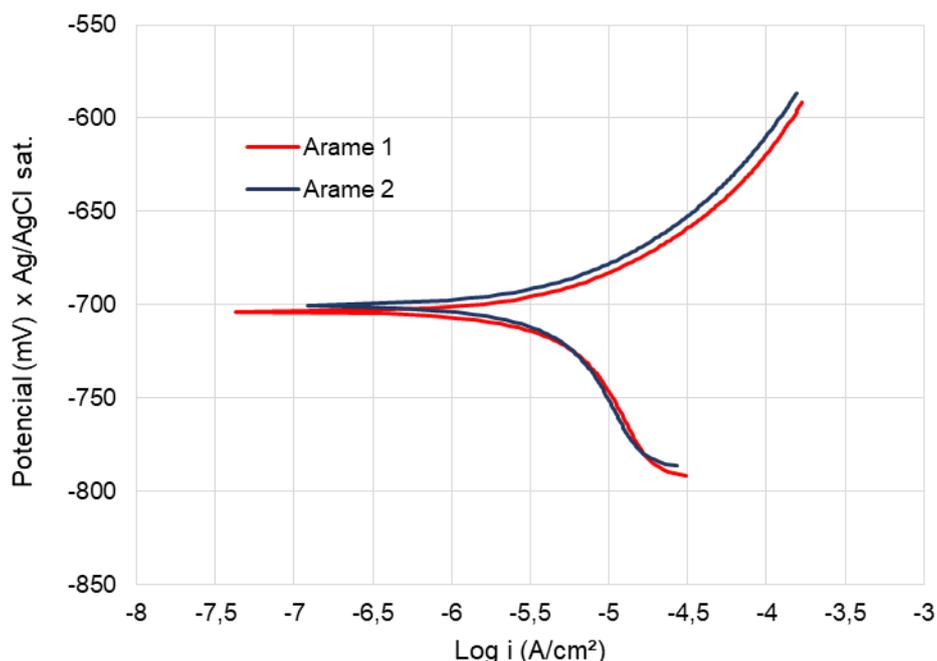


Figura 10. Gráficos de Tafel dos perfis de arame 1 e 2 expostos a água oceânica substituta. [9]

Tabela 7. Taxa de corrosão obtida por ensaio eletroquímico e categorização qualitativa conforme NACE RP0775-2005

Perfil	Taxa de corrosão média (mm/ano)	Potencial de corrosão (mV)	Categoria qualitativa de corrosão
Arame 1	$0,15249 \pm 1,00 \times 10^{-3}$	-703,82	Alta
Arame 2	$0,14808 \pm 5,03 \times 10^{-3}$	-700,3	Alta

3 CONCLUSÃO

Sob atmosferas mais agressivas tal qual presenciadas em operação próximas ao leito oceânico, distintas por valores de dezenas de atmosferas de pressão, temperaturas de trabalho de até 90°C, saturação de gases como CO₂ e H₂S e, por conseguinte, de íons de potencialmente formadores de produtos corrosivos, os risers tendem particularmente a colapsar em componentes de susceptibilidade a degradação mais agressiva.

Os resultados obtidos pelos experimentos permitiram observar:

- Nas condições dos ensaios realizados, a temperatura e pressão ambientes, não se apresentou diferença no comportamento dos dois arames, ainda que possuam diferentes teores de C. Como previsto, o mecanismo de corrosão é generalizada.

- ao simular o processo de corrosão por fresta, foi observada maior intensidade de corrosão por pites no tempo de imersão dos nossos ensaios. A compreensão desse efeito fundamental porque o arame montado no riser de camadas não aderentes apresenta frestas em sua montagem. A eventual permissividade da capa externa a entrada da solução corrosiva (água oceânica) na região anular do riser tende a expor as armaduras de tração ao processo de degradação de corrosão por frestas. A associação desse mecanismo com elevado tensionamento do material tende a propiciar a corrosão sob tensão seguida de fratura do componente durante a operação.

Agradecimentos

CAPES, CNPq pelo financiamento e PETROBRAS pelo fornecimento dos arames.

REFERÊNCIAS

- 1 KYRIAKIDES, S.; CORONA, E. Mechanics of Offshore Pipelines. Oxford: Elsevier, 2007.
- 2 BAI, Y.; BAI, Q. Subsea Pipelines and Risers. Oxford: Elsevier Ltd, 2005.
- 3 SERTÁ, O. B.; LONGO, C. E. V.; ROVERI, F. E. OTC 13185: Riser Systems for Deep and Ultra-Deepwaters. Offshore Technology Conference. Houston (TX): OTC. 2001.
- 4 BAI, Y.; BAI, Q.; RUAN, W. Flexible Pipes. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons, 2017.
- 5 DIKDOGMUS, H. Riser Concepts for Deep Waters. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology Department, 2012.
- 6 AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Recommended Practice for Flexible Pipe. Washington D.C.: API Publishing Series, 2002.
- 7 SZKLARSKA-SMIALOWSKA, Z. Pitting and Crevice Corrosion. Houston (TX): Nace International, 2005.
- 8 LI, Y.Z. et al. Crevice corrosion of N80 carbon steel in CO₂-saturated environment containing acetic acid. Corrosion Science 2016. Elsevier Ltd, 2016.
- 9 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D1141-98 (2013): Standard Practice for the Preparation of Substitute Ocean Water. West Conshohocken (PA): ASTM International, 2013.
- 10 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. G31-72 (2004): Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals. West Conshohocken (PA): ASTM International, 2004.
- 11 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. G1-03 (2017): Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. West Conshohocken (PA): ASTM International, 2004.
- 12 NACE. RP0775-2005: Standard Recommended Practice Preparation, Installation, Analysis and Interpretation of Corrosion Coupons in Oilfield Operations. Houston (TX): NACE International, 2005.
- 13 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. G39-99 (2016): Standard Practice for Preparation and Use of Bent-Beam Stress-Corrosion Test Specimens. West Conshohocken (PA): ASTM International, 2016.
- 14 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. G46-94 (2005): Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion. West Conshohocken (PA): ASTM International, 2005.
- 15 ARCELORMITTAL. Guia do Aço. ArcelorMittal. 2013 [acesso em 16 maio 2019]; 38-40. Disponível em: <http://brasil.arcelormittal.com.br/pdf/quem-somos/guia-aco.pdf>.
- 16 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8404:1984: Indicação do Estado de Superfícies em Desenhos Técnicos - Procedimento. Rio de Janeiro (RJ): ABNT, 1984.