

AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE TAXA DE CORROSÃO APLICADAS A SISTEMAS DINÂMICOS DE TRANSPORTE DE FLUIDOS

Luciano da Rocha Magalhães, Universidade Federal de Uberlândia, lucianormag@doutorado.ufu.br

Guilherme Rodrigues da Cunha, Universidade Federal de Uberlândia, guilhermercunha1993@hotmail.com

Juliano Oseias de Moraes, Universidade Federal de Uberlândia, j_oseias@yahoo.com

Sinésio Domingues Franco, Universidade Federal de Uberlândia, sdfranco@ufu.br

Sheila Cristina Canobre, Universidade Federal de Uberlândia, scanobre@iqufu.ufu.br

Resumo. A degradação de tubulações é um tema de grande importância para a indústria de óleo e gás. Dentre os diversos tipos de danos que um duto pode sofrer, a corrosão de sua superfície interna tem destaque, ocorrendo devido à interação do metal com o fluido prospectado, normalmente composto por água do mar e/ou água produzida (de alto teor salino), óleo, gases e particulados. A fim de estimar os efeitos da corrosão e, assim, prever a vida útil de uma tubulação, torna-se necessário aplicar técnicas de medição da taxa de degradação em condições dinâmicas. Para avaliar o desempenho das técnicas de cupons de perda de massa e resistência à polarização linear, condições de transporte de fluidos foram simuladas em laboratório utilizando um flowloop com escoamento contendo água com 3,5% de NaCl (agente corrosivo) e areia (agente erosivo). Os resultados mostraram que as técnicas podem ser aplicadas num tribossistema dinâmico, pois os resultados são compatíveis com os efeitos medidos em condições estáticas para a técnica de resistência de polarização linear.

Palavras chave: corrosão, taxa de corrosão, sistema dinâmico, transporte de fluidos.

1. INTRODUÇÃO

Considerando a grande dependência das atividades cotidianas e industriais da sociedade atual de combustíveis fósseis, a extração de petróleo coloca-se como um dos campos de grande demanda por novas tecnologias ou aperfeiçoamento das técnicas existentes.

Um sistema de extração de petróleo pode ser dividido em três subsistemas: a plataforma; os equipamentos de perfuração e prospecção do produto no fundo do mar e os dutos de transporte de fluidos (líquido ou gás), que podem ser tubulações rígidas ou flexíveis e operarem na vertical (chamados então de *riser*) ou na horizontal (*flowline*). Uma das diferenças mais significativas entre os dois tipos de dutos está em sua capacidade de curvatura, traduzida pelo ângulo que o *riser* faz com a saída da plataforma. Os dutos podem chegar a quilômetros de comprimento dependendo da profundidade de extração e tal extensão implica numa considerável área exposta a um ambiente hostil, principalmente ao fluido de prospecção na parte interna da tubulação; fluido este que, devido à sua composição mista de água salina, óleo e particulados (principalmente areia), pode se tornar um agente de degradação de grande impacto.

Devido à grande complexidade do sistema de extração de petróleo e das diversas variáveis envolvidas, pode-se dizer que praticamente todos os tipos de desgaste podem ser encontrados mediante uma análise minuciosa deste tribossistema. Entretanto, quando se fala da degradação experimentada pela tubulação em sua parte interna, há um destaque principal para a corrosão, para a erosão e para a associação destes dois tipos, chamada de corrosão-erosão ou erosão-corrosão (a diferença de nomenclatura indica qual processo é dominante).

Considerando os custos envolvidos na substituição de dutos de transporte ou, principalmente, os danos causados por um acidente ambiental de vazamento de óleo no mar devido a um rompimento da tubulação, torna-se patente possuir metodologias que permitam avaliar os efeitos da corrosão-erosão num ambiente controlado de laboratório. Para tal, são necessários: a) um circuito de testes capaz de simular as condições de operação de campo, chamado de *flowloop*; b) uma metodologia de qualificação e quantificação dos danos sofridos pela tubulação, isto é, técnicas de medição da taxa de degradação (corrosiva e erosiva) e c) um sistema e uma metodologia nos quais técnicas de proteção ou inibição da corrosão possam ser aplicadas, avaliadas e aprimoradas.

Por meio destes três itens, torna-se possível a predição dos danos sofridos pela tubulação e a implementação de técnicas que permitam a minimização dos custos envolvidos na produção de óleo e gás. O objetivo deste trabalho, então, é simular em laboratório uma tubulação de transporte para avaliar técnicas de medição da taxa de desgaste em sistemas estáticos e dinâmicos, quais sejam: cupons de perda de massa e resistência à polarização linear.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

2.1. Tubulação de testes experimentais

A fim de simular com precisão e exatidão as condições operacionais às quais estão submetidas as tubulações de transporte de fluidos, torna-se necessário estudar este tribossistema numa situação o mais próximo possível da escala real e das condições de campo.

Para tal, o Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste (LTAD-UFU) conta com um circuito de testes (*flowloop*) chamado de LOOP1. O equipamento consiste basicamente em um circuito fechado de dutos com: a) um reservatório de fluidos com capacidade de três mil litros; b) uma tubulação de aço inoxidável austenítico 316L de cerca de 60 metros de comprimento e diâmetro de 101,6 mm (4 polegadas) que pode operar com trechos na horizontal ou na vertical; c) duas bombas de cavidades progressivas (BCP); d) um injetor de partículas erosivas (dosador de areia); e) um hidrociclone para separação de partículas erosivas da fase contínua após sua passagem pela seção de teste e f) um reservatório de CO₂ para purga (remoção do oxigênio dissolvido). A figura 2 mostra o LOOP1.

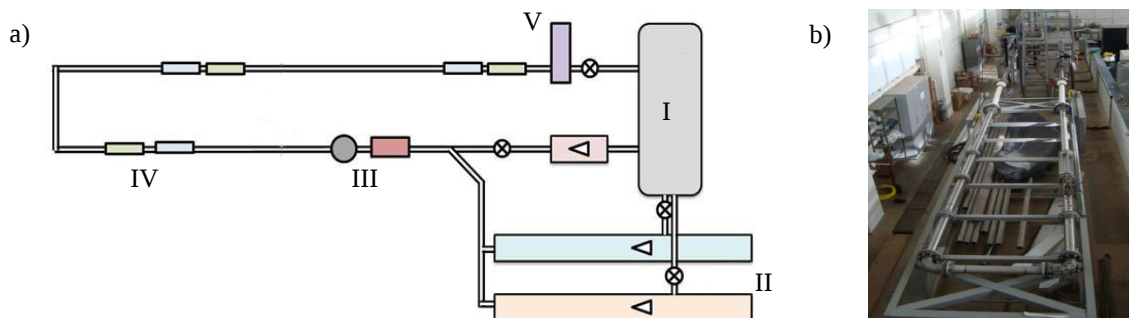


Figura 2. a) representação esquemática do *flowloop* onde I é o reservatório, II são as BCPs, III é o dosador de areia, IV são as amostras e V é o coletor de areia. b) foto real do LOOP1

As condições experimentais utilizadas foram as seguintes: a) fluido composto por água deionizada com NaCl a 3,5%; b) injeção de areia normal brasileira 100 como agente erosivo; c) purga com CO₂ do fluido; d) temperatura média de 45°C; e) tempo de ensaio de 45 horas e f) escoamento horizontal.

2.2. Cupons de perda de massa

Esta é uma técnica gravimétrica, baseada na medição da perda de material da superfície da amostra. Ou seja, o efeito de degradação sofrido pela amostra é estudado a partir de suas consequências.

Os cupons propriamente ditos são peças móveis feitas do mesmo material, inseridas no meio degradante. Para o presente trabalho, foram utilizadas amostras do aço VMEC 134 AP e composta por 0,20% de carbono, 1,6% de manganês e 0,55% de silício, conforme especificação da Vallourec Tubos dos Brasil SA.

A figura 3 mostra um cupom com destaque para a tinta anticorrosiva utilizada para que apenas uma face esteja exposta ao meio corrosivo. A utilização desta técnica é regulamentada pelas normas internacionais ASTM G-1 e G-4. A taxa de corrosão por esta técnica pode ser calculada com a equação 1 (ROBERGE, 2007):

$$TC = \frac{K(m_1 - m_2)}{A(t_1 - t_2)\rho} \quad (1)$$

Onde TC é a taxa de corrosão (mm/ano); m_1 e m_2 são a massa inicial e final (g); t_1 e t_2 são o tempo inicial e final (horas), ρ é densidade do material (g/cm³), A é a área exposta (cm²) e K é uma constante para conversão de unidades.



Figura 3. Cupom de perda de massa de VMEC 134 AP

2.3. Resistência à Polarização Linear (LPR)

Neste método eletroquímico de corrente-contínua, chamado em inglês de *Linear Polarization Resistance (LPR)*, a avaliação da taxa de corrosão é realizada de forma indireta, utilizando-se como ferramenta a extrapolação da curva de Tafel e o diagrama de polarização do material avaliado. Isto equivale a dizer que o fenômeno (a corrosão) está sendo investigada a partir de suas causas.

A resistência à polarização (R_p) é definida como sendo a oposição que um material, exposto a um meio, oferece à oxidação durante a aplicação de um potencial externo. Esta resistência, inversamente proporcional à taxa de corrosão, é

obtida pela inclinação da reta do gráfico do potencial *versus* densidade de corrente próxima ao potencial de corrosão (SILVA, 2008).

O eletrodo utilizado para as medições eletroquímicas é mostrado na figura 4. O eletrodo de trabalho (ET) foi fabricado em aço VMEC 134, enquanto que o eletrodo de referência (ER) e o contra-eletrodo (CE) foram confeccionados em uma superliga de níquel-cromo (Inconel 625). Os parâmetros para a medida foram os seguintes: a) velocidade de varredura de 0,1 mV/s; b) intervalo de aquisição de 0,05 V e c) amplitude da perturbação de $\pm 0,10$ mV em torno do potencial de circuito aberto (OCP) do material ensaiado.

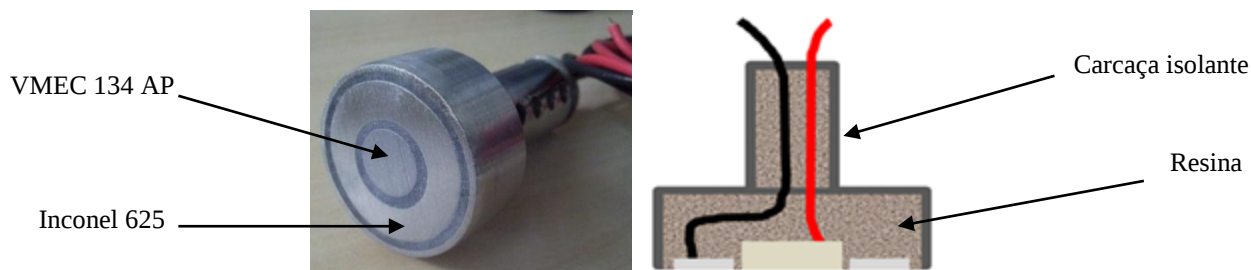


Figura 4. Eletrodo de VMEC 134 AP e Inconel 625

A taxa de corrosão por esta técnica pode ser calculada com a equação 2:

$$TC = \left(\left(\left(\frac{1}{2,303} \right) * \left(\frac{0,12 * 0,12}{0,12 + 0,12} \right) \right) * R_p * \frac{1000000}{A} \right) * 0,00327 * ma/d \quad (2)$$

Onde A é a área exposta (cm^2), ma é a massa atômica média (g/mol), d é a densidade da liga (g/cm^3) e R_p é a resistência à polarização linear (Ω).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados de taxa de corrosão utilizando quatro cupons, calculados pela equação 1, estão apresentados na tabela 1. Para o cálculo da TC, utilizou-se $A = 5,9984 \text{ cm}^2$ (área da superfície côncava do cupom) e $\rho = 7,86 \text{ g/cm}^3$ (densidade média do aço) e $t = 45$ horas. A medição de perda de massa de cada amostra foi feita cinco vezes utilizando uma balança do fabricante Shimadzu de resolução 0,1 mg.

Tabela 1. Taxa de corrosão pela técnica dos cupons de perda de massa

	Cupom 1	Cupom 2	Cupom 2	Cupom 4	Média dos cupons
Perda de massa média [mg]	198,3	203,02	176,96	205,4	195,92
Desvio-padrão da perda de massa [mg]	0,19	0,13	0,18	0,15	0,16
TC [mm/ano]	6,16	6,31	5,50	6,38	6,08

Os resultados da tabela 1 mostram que os resultados das quatro amostras não diferiram significativamente entre si. Isto permite dizer que a técnica possui boa repetitividade e que não se deve esperar um desgaste maior da parte superior ou da inferior da tubulação, uma vez que não há diferença entre os cupons superiores ou inferiores. A forma como os cupons foram dispostos na tubulação pode ser visto na figura 5.

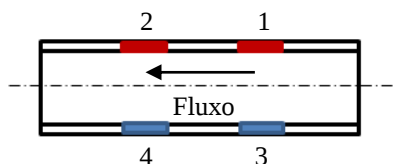


Figura 5. Disposição dos cupons na tubulação.

Os resultados de taxa de corrosão pela técnica eletroquímica são apresentados na tabela 2. Os valores apresentados são a média de 10 medições realizadas ao longo do teste.

Considerando os resultados da tabela 2, a comparação da técnica eletroquímica num ensaio estático utilizando como eletrodo de referência Ag/AgCl com o mesmo ensaio utilizando como eletrodo de referência o Inconel 625 mostra que este último pode ser um substituto viável para o eletrodo clássico de Ag/AgCl. Esta substituição se mostra necessária devido à fragilidade do primeiro, o que o torna incompatível com sistemas dinâmicos como o *flowloop* utilizado. A diferença entre os valores de 0,04 e 0,03 mm/ano para os casos com Ag/AgCl e Inconel, respectivamente, corrobora esta

afirmação. Isto porque, mesmo com uma diferença de 25%, o desvio-padrão mostra que as medidas são estatisticamente equivalentes. Esta variação também pode ser atribuída à característica do Inconel 625, que não é tão inerte quanto o eletrodo de Ag/AgCl.

Tabela 2. Taxa de corrosão pela técnica de Resistência à Polarização Linear

	Ensaio estático com Ag/AgCl como ER	Ensaio estático com Inconel 625 como ER	Ensaio dinâmico com Inconel 625 como ER
TC [mm/ano]	0,041	0,031	0,105
DP [mm/ano]	0,008	0,011	0,028

Ainda considerando a tabela 2, uma segunda comparação, desta vez entre a técnica LPR aplicada a um sistema estático e a um dinâmico, mostra que a técnica produz resultados condizentes com o esperado. Num ambiente dinâmico com a presença de areia como agente erosivo espera-se uma taxa de degradação do material superior àquela medida num ensaio estático, uma vez que existirá uma interação entre corrosão e erosão, amplificando o efeito isolado de cada uma, como mostrado por Silva (2008). A tabela 2 mostra que a taxa de corrosão num meio estático utilizando Inconel como eletrodo de referência é de 0,031 mm/ano, enquanto que a taxa num meio dinâmico é de 0,105 mm/ano.

A comparação entre as taxas de corrosão obtidas pela técnica dos cupons de perda de massa e pela técnica LPR (tabelas 1 e 2, respectivamente) mostra que as duas TC diferiram significativamente, e as causas desta discrepância necessita de maiores estudos. Entretanto, podem-se especular algumas razões: i) a TC por Cupons é calculada por apenas dois pontos (medição de massa antes do ensaio e após o ensaio), enquanto que a medição por LPR é feita em tempo real; ii) a presença de oxigênio dissolvido na água durante o *start-up* do *flowloop* pode ter aumentado consideravelmente a taxa de corrosão para os cupons; iii) a maior área exposta dos cupons faz com que o efeito da erosão seja mais pronunciado, iv) o tempo de ensaio com os cupons é muito curto, fazendo com que as medições sejam feitas dentro do intervalo de *running-in* onde a taxa de corrosão é muito acentuada e ainda não atingiu o regime permanente.

4. CONCLUSÕES

As técnicas de medição de taxa de corrosão se mostraram aplicáveis tanto a sistemas estáticos (na célula eletroquímica) quanto a ensaios dinâmicos (no LOOP1) no que se diz respeito a fatores operacionais.

A técnica LPR apresentou resultados condizentes com que se esperava, o que mostrou que o eletrodo de referência de Inconel 625, mais robusto para aplicações dinâmicas, pode ser utilizado em substituição ao eletrodo de Ag/AgCl que, apesar de ser mais inerte, é frágil demais para medições em um *flowloop*.

A técnica dos cupons precisa de maiores investigações para identificar a influência de fatores como tempo de exposição e presença de O₂, a fim de se explicar a diferença significativa com relação aos resultados da técnica LPR.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM International. 2013. Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, PA.

Silva, F.J. 2008. “Erosão, Corrosão, Erosão-Corrosão e Cavitação do Aço ABNT 8550 Nitretado a Plasma”. 300f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

Roberge, R.R. 2007. “Corrosion Inspection and Monitoring”. Ed. Wiley

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia e ao seu programa de pós-graduação pelo suporte a este trabalho, à CAPES, entidade do Governo Brasileiro voltada para a formação de recursos humanos, pela concessão de recursos e também à empresa PETROBRAS pelo fomento a esta pesquisa.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.