

## COMPARAÇÃO DE TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DA TAXA DE CORROSÃO EM UM SISTEMA DINÂMICO DE TRANSPORTE DE FLUIDOS

Luciano da Rocha Magalhães, Universidade Federal de Uberlândia, [lucianormag@doutorado.ufu.br](mailto:lucianormag@doutorado.ufu.br)

Sinésio Domingues Franco, Universidade Federal de Uberlândia, [sdfranco@ufu.br](mailto:sdfranco@ufu.br)

Juliano Oseias de Moraes, Universidade Federal de Uberlândia, [j\\_oseias@yahoo.com](mailto:j_oseias@yahoo.com)

**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, devido à água com alto teor salino e a particulados, tem grande destaque. 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 escolhidas (cupom de perda de massa, resistência à polarização linear e espectroscopia de impedância eletroquímica), condições de transporte de fluidos foram simulados em laboratório utilizando um flowloop contendo água com 3,5% de NaCl (agente corrosivo) e areia (agente erosivo). Os resultados mostraram que as técnicas puderam ser aplicadas satisfatoriamente e permitiram a previsão da taxa de corrosão. Para uma maior eficácia, a técnica de cupons deve ser aplicada num período longo de tempo.

**Palavras chave:** corrosão, cupons de perda de massa, resistência a polarização linear, espectroscopia de impedância eletroquímica, dutos.

### 1. INTRODUÇÃO

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

As condições de operação existentes em poços de petróleo são bastante adversas, resultando em importantes danos a tubulações e componentes mecânicos devido à corrosão, à erosão e à associação destes dois tipos, chamada de corrosão-erosão. Essa severidade se deve, principalmente, à presença de água e areia produzidas na perfuração, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S. Os efeitos negativos da combinação dessas variáveis tornam-se mais importantes na medida em que se aumenta a temperatura e a pressão de operação. Isso é particularmente importante para os poços do pré-sal, onde se têm maiores concentrações de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S bem como temperaturas mais elevadas (Garverick, 1994).

Considerando os custos envolvidos na substituição de dutos de transporte e, principalmente, os danos causados por um acidente ambiental de vazamento de óleo no mar, torna-se relevante investigar metodologias que permitam avaliar os efeitos da corrosão-erosão num ambiente controlado de laboratório. Para reproduzir essas condições, é fundamental, primeiramente, que se tenha uma infraestrutura capaz de conduzir experimentos com areia e água com elevado teor salino e reproduzir as velocidades, temperaturas das fases da mistura e os padrões de escoamento, que podem variar em função da inclinação. Assim, a transferência dos resultados obtidos poderá ser realizada com maior segurança para as condições de campo. O segundo fator de vital importância no estudo dos danos sofridos pelos dutos é a técnica de monitoramento e quantificação da degradação. De acordo com Roberge (1999), os diferentes tipos de técnicas podem ser classificados em i) diretas ou indiretas, de acordo com qual parâmetro está sendo monitorados na corrosão; ii) intrusivas ou não-intrusivas, segundo a necessidade de se entrar em contato direto com o meio degradante e iii) online ou offline, caso os resultados da técnica possam ser adquiridos enquanto o processo de corrosão acontece, ou seja, em tempo real.

Dentre estas técnicas, destacam-se o Cupom de Perda de Massa (CPM), técnica gravimétrica direta, intrusiva e *offline*; a Resistência à Polarização Linear (LPR), técnica eletroquímica direta, intrusiva e *online* e a Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE), também uma técnica eletroquímica direta, intrusiva e *online*.

A aplicação destas técnicas em sistemas dinâmicos de transporte de fluidos é um assunto recente e carece de estudos mais aprofundados. O objetivo deste trabalho foi: a) monitorar, utilizando as técnicas descritas, o processo corrosivo-erosivo uma tubulação de aço-carbono de um flowloop contendo uma solução aquosa de 3.5% de NaCl e areia sob pressão de 3 bar e temperatura de operação de 45° C; b) comparar os resultados obtidos a fim de comprovar a eficácia das técnicas.

### 2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

#### 2.1. Flowloop e condições 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. Nesse intuito, o Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste da Universidade Federal de Uberlândia (LTAD-UFU) construiu um *flowloop* chamado de LOOP1 (Figura 1).

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; *e)* um hidrociclone para separação de partículas erosivas da fase contínua após sua passagem pela seção de teste e *f)* um reservatório de CO<sub>2</sub> para remoção do oxigênio dissolvido.

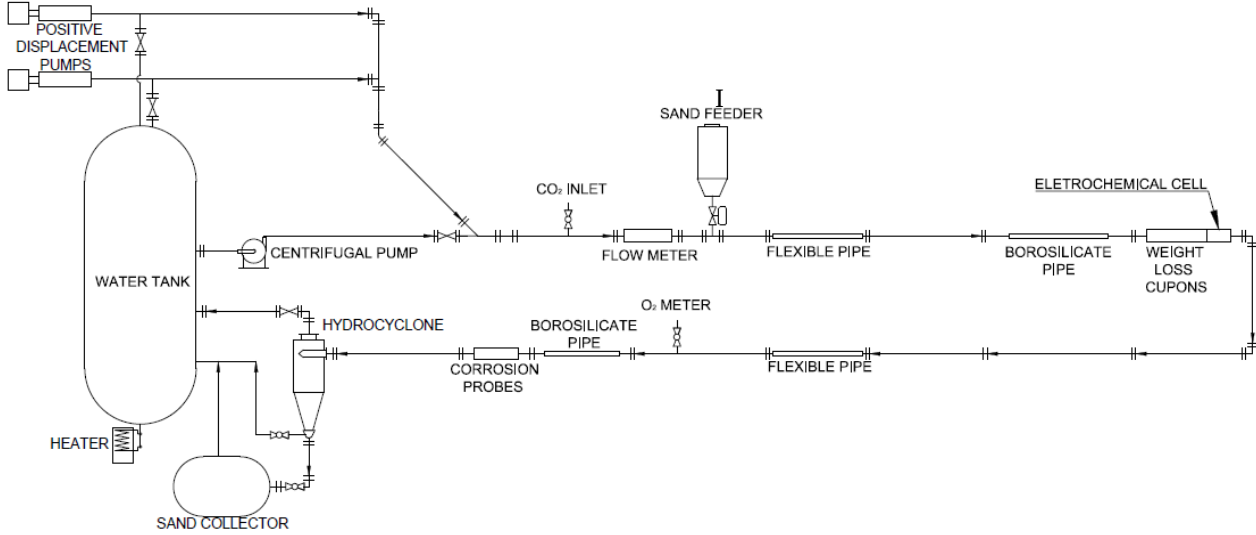


Figura 1. Representação esquemática do flowloop.

As condições experimentais utilizadas nos testes para implementação e comparação das técnicas foram as seguintes:

- Fluido: água deionizada contendo 3,5% de NaCl de grau técnico;
- Agente erosivo: areia 100 ( $150 \mu\text{m} < \phi < 300 \mu\text{m}$ );
- Tempo total de ensaio: 45 horas;
- Temperatura média do fluido: 45°C;
- Vazão: 1.567,8 m<sup>3</sup>/hora;
- Velocidade do fluido: 3,0 m/s;
- Teor de O<sub>2</sub>: menor que 5 ppb.
- Purga por CO<sub>2</sub> por 60 minutos.

## 2.2 Cupom de Perda de Massa (CPM)

Esta técnica foi utilizada seguindo as orientações das normas internacionais ASTM G1-03 (2011) e ASTM G4-01 (2014). A taxa de corrosão por esta técnica foi calculada com a Eq. 1 (ASTM G-1, 2011):

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

Onde  $TC$  é a taxa de corrosão (mm/ano);  $m_1$  e  $m_2$  são as massas inicial e final (g);  $t_1$  e  $t_2$  são os tempos inicial e final (horas);  $\rho$  é densidade do material (g/cm<sup>3</sup>);  $A$  é a área exposta (cm<sup>2</sup>) e  $K$  é uma constante para conversão de unidades.

Para a medição da  $TC$  utilizando a técnica CPM, foram utilizados cupons fabricados do aço VMEC 134 AP, cuja composição é: 0,2% C, 1,6% Mn e 0,55% Si, conforme especificação da Vallourec Tubos dos Brasil S.A.

## 2.3. Resistência à Polarização Linear (LPR)

A taxa de corrosão por esta técnica foi calculada com a Eq. 2 (ASTM G102-89, 2010):

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

Onde  $A$  é a área exposta ( $\text{cm}^2$ ),  $ma$  é a massa molar média ( $\text{g/mol}$ ),  $d$  é a densidade da liga ( $\text{g/cm}^3$ ) e  $R_p$  é a resistência à polarização linear ( $\Omega$ ).

Para a medição da TC utilizando as técnicas eletroquímicas, utilizou-se um potenciostato modular com corrente máxima de 2 A e potencial de 30V, modelo PGSTAT 302N do fabricante AUTOLAB, interconectado software de controle Nova, versão 1.11. Como célula de teste, construiu-se um eletrodo utilizando o aço VMEC 134 AP como eletrodo de trabalho (ET) e a liga de níquel Inconel 625 como contra-eletrodo (CE) e eletrodo de referência (ER), mostrado na Figura 2. O Inconel 625 possui composição de 58,0% Ni, 20,0% Cr, 5,0% Fe e 8,0% Mo.



Figura 2. Cupom da técnica CPM (esquerda) e eletrodo das técnicas LPR e EIE (direita).

## 2.4. Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE)

Esta técnica foi aplicada seguindo as recomendações das normas internacionais ASTM G3-14 e G106-89 (2010). O eletrodo utilizado foi o mesmo da técnica LPR, mostrado na Figura 2.

Para os parâmetros da EIE, utilizou-se uma amplitude de perturbação  $\pm 10$  mV, amplitude de frequência de 1 mHz a 1 MHz. Com o valor de  $R_p$  obtido a partir do diagrama de Bode, a TC foi calculada utilizando a Eq. 2.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A taxa de corrosão pela técnica CPM é apresentada na Tabela 1, utilizando:  $A = 7,9702 \text{ cm}^2$  (área que sofreu corrosão),  $\rho = 7,86 \text{ g/cm}^3$  (densidade média do aço),  $t_1 = 0$  e  $t_2 = 45$  horas e  $K = 8,76 \times 10^4$  segundo ASTM G-1 (2011).

Tabela 1. Perda de massa e taxa de corrosão calculada pela CPM

|                     | Cupom 1 | Cupom 2 | Cupom 3 | Cupom 4 | Média | DP   |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|-------|------|
| Perda de massa [mg] | 198,3   | 203,0   | 176,9   | 205,4   | 195,9 | 13,0 |
| TC [mm/ano]         | 6,16    | 6,30    | 5,50    | 6,38    | 6,08  | 0,40 |

A

Figura 3 mostra os resultados da medição da taxa de corrosão utilizando a técnica LPR. Para o cálculo, utilizou-se uma área exposta  $A$  do ET igual a  $1,13 \text{ cm}^2$ , massa atômica  $ma$  do ferro igual a 55,845 u e densidade média  $\rho$  do aço de  $7,86 \text{ g/cm}^3$ . De acordo com esses resultados, a TC média foi de 0,09 mm/ano.

No que diz respeito à técnica EIE, a partir dos diagramas de Nyquist não foi possível determinar os valores de  $R_p$ , pois as medidas apresentaram uma dispersão muito grande dos pontos registrados em baixas frequências, devido às vibrações do eletrodo resultante do fluxo turbulento do eletrólito durante as medidas no *flowloop*. Além disso, a presença de areia em fluxo turbulento pode provocar uma decapagem na camada de óxido formado na superfície do eletrodo. Então, ao longo do experimento, provavelmente ocorreram sucessivas decapagens e formações de filmes de óxidos os quais causaram uma variação nos valores de impedância, principalmente, na região de baixa frequência, pois correspondem aos processos que relaxam mais lentamente.

Não obstante, foi possível obter os valores do módulo de impedância  $Z(w)$  desta técnica a partir do diagrama de Bode. É importante ressaltar que a impedância apresentou um valor médio de  $9150 \Omega$ , enquanto que o valor de  $R_p$  pela técnica LPR foi de  $7500 \Omega$ . A

Figura 4 traz os resultados de módulo  $Z(w)$  de impedância obtidos pela técnica EIE.

Observa-se uma diferença significativa entre as TC obtidas entre a técnica CPM e as duas técnicas eletroquímicas. Isso acontece pois a técnica CPM ainda não atingiu o regime permanente da TC. Não foi possível, entretanto, estender o ensaio por mais que 48 horas devido aos custos e condições experimentais. Têm-se buscado alternativas ou novas metodologias que permitam comparar as técnicas com maior eficácia.

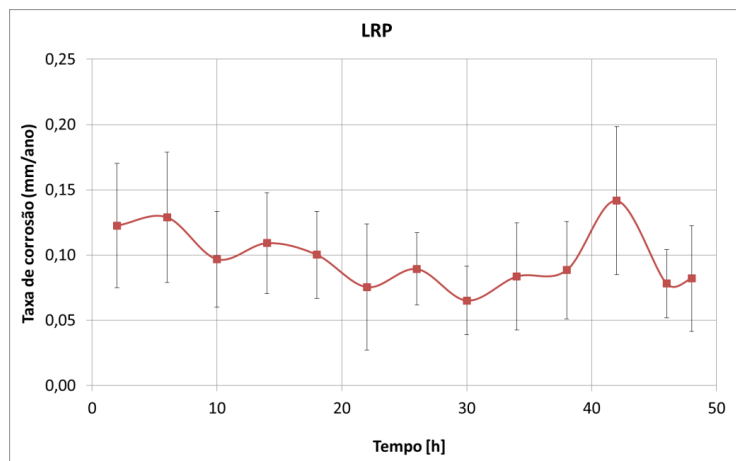


Figura 3. Taxa de corrosão pela técnica LRP

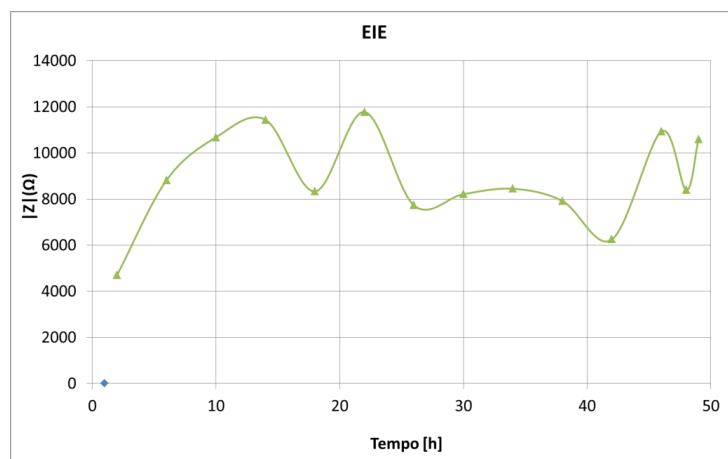


Figura 4. Módulo de impedância  $Z(w)$  pela técnica EIE

#### 4. CONCLUSÕES

A aplicação das técnicas CPM, LPR e EIE se mostrou satisfatória no *flowloop* em condições dinâmicas seguindo os padrões determinados pelas normas internacionais.

A taxa de corrosão das técnicas eletroquímicas mostrou que ambas apresentaram resultados similares. Entretanto, a técnica EIE carece de mais estudos para uma aplicação mais precisa, principalmente no que diz respeito à minimização de interferências que impedem a utilização do diagrama de Nyquist para obtenção da resistência à polarização.

A comparação da taxa de corrosão da técnica CPM e LPR apresentou uma significativa discrepância. Uma nova metodologia deve ser desenvolvida para que a TC da técnica CPM seja medida durante o regime permanente, onde os valores já terão atingido o equilíbrio.

#### 5. REFERÊNCIAS

- ASTM International. 2013. "Annual Book of ASTM Standards". West Conshohocken, PA.
- Garverick, L. 1994. "Corrosion in the Petrochemical Industry". ASM International.
- Roberge, P.R. 1999. "Handbook of Corrosion Engineering". Ed. McGraw-Hill.
- Roberge, P.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, à FAPEMIG e ao CNPq pela concessão de recursos e também à empresa PETROBRAS pelo fomento a esta pesquisa.

## **7. ABSTRACT**

The degradation of pipes is a topic of great importance for the oil and gas industry. Among the various types of damage that a pipeline can suffer, internal corrosion due to water with high salt concentration and due to particulates have been in the spotlight. In order to estimate the effects of corrosion and, thus, predict the pipe lifetime, it becomes necessary to apply techniques of degradation rate measurement under dynamic conditions. To evaluate the performance of the chosen techniques (weight loss coupon, the linear polarization resistance and electrochemical impedance spectroscopy), conditions of oil transport were simulated in the laboratory using a flowloop containing water with 3.5% NaCl (corrosive agent) and sand (erosive agent). The results showed that the techniques could be applied satisfactorily and it allowed the prediction of the corrosion rate. For greater effectiveness, the coupons technique should be applied over a long period.

## **8. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES**

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