
Copyright 2018, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2018, em São Paulo, no mês de maio de 2018.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Avaliação da Corrosão Interna Utilizando Técnicas Intrusivas e Não Intrusivas em Condições Controladas em Laboratório

Victor G. Silva¹, Gustavo L. Vaz², Pedro A. Ferreira³, Anna Ramus⁴, Neusvaldo L. de Almeida⁵

Abstract

Internal corrosion is one of the major problems affecting the integrity of pipelines and process equipment. For this reason, the internal corrosion monitoring becomes essential to anticipate eventual problems and select the most appropriate strategy to mitigate the corrosive process. Due to the problems related to the cost, logistics and safety inherent to coupon and electric resistance (ER) probe retrieving, it is very important to seek alternatives to the current methods, in order to optimize the monitoring tasks. The use of non-intrusive equipment (NIE) to monitor internal corrosion is an alternative that aims to optimize this step, as well as NIE has easy installation and maintenance, higher data reliability and faster results. These systems consist of estimating the trend of the corrosion rate through devices installed on the external side of pipelines without the need of access fittings, unlike conventional techniques. The great advantage of using this technique is the absence of interventions for components retrieving, minimizing operational risks. To evaluate such equipment, tests were carried out under dynamic conditions, varying the fluid characteristics in order to verify the speed of response of some commercial devices, always comparing them to conventional methods (coupon and ER probe). The results showed good correlation between both techniques (intrusive and non-intrusive). However, in one of the test conditions, there was a divergence in the result due to difference in position between NIE and intrusive equipments, which caused more wear in the coupons and ER probes than in the pipe wall.

Keywords: internal corrosion, corrosion monitoring, non-intrusive

Resumo

A corrosão interna constitui um dos principais problemas que afetam a integridade de dutos e equipamentos de processo. Por este motivo, o monitoramento da corrosão interna se torna fundamental para antever problemas e selecionar o método mais adequado para mitigar o processo corrosivo. Devido aos problemas relacionados ao custo, logística e segurança, nas atividades relacionadas à troca de cupom e sondas, é fundamental buscar alternativas aos métodos utilizados atualmente, de modo a otimizar esta atividade. O uso de equipamentos não

¹ Mestre, Engenheiro de Inspeção - PETROBRAS

² Mestre, Químico de Petróleo - PETROBRAS

³ Mestre, Engenheiro de Petróleo - PETROBRAS

⁴ Mestre, Químico Industrial - IPT

⁵ Mestre, Físico - IPT

intrusivos para o monitoramento da corrosão interna é uma alternativa que visa otimizar esta etapa, garantido confiabilidade nos dados obtidos e mais rapidez na obtenção dos resultados. Estes equipamentos consistem em estimar a tendência da taxa de corrosão através de dispositivos instalados externamente à tubulação/equipamento, podendo ser instaladas sem a necessidade de conexões de acesso, ao contrário das técnicas convencionais. A grande vantagem da utilização desta técnica é a ausência de intervenções para troca de componentes e/ou manutenção. Para avaliar estes equipamentos foram realizados ensaios em condições dinâmicas, variando as características do fluido de modo a verificar a velocidade de resposta de alguns equipamentos comerciais, sempre comparando-os com os métodos convencionais (cupom e sonda RE). Os resultados mostraram boa correlação dos dados obtidos através das diversas técnicas avaliadas. No entanto, em uma das condições de teste foi observado divergência no resultado, entre as técnicas intrusivas e não intrusivas, devido ao local de instalação dos equipamentos, que provocou mais desgaste nos cupons e sondas RE do que na tubulação de teste.

Palavras-chave: corrosão interna, monitoração da corrosão, não-intrusivo

Introdução

A corrosão interna é um dos principais problemas relacionados à integridade de dutos. A ocorrência da corrosão interna é função do tipo de material e composição dos fluidos. Geralmente, o material utilizado na fabricação de dutos é o aço ao carbono que, apesar de ter um baixo custo e boa soldabilidade, é bastante suscetível à corrosão na presença de água e oxigênio. Além disso, alguns contaminantes, como CO₂, H₂S, sais e microorganismos, presentes nesses fluidos, aumentam sua corrosividade [1].

Por estas razões, são utilizados alguns métodos de controle da corrosão, como o uso de revestimentos protetores, injeção de produtos químicos, como inibidores de corrosão, lançamento de PIG de limpeza, entre outros. Para a aplicação do método de controle mais apropriado, é necessário monitorar a corrosão interna para determinar o potencial de corrosividade dos fluidos e ter um melhor conhecimento do processo corrosivo [1].

Uma das etapas mais importantes na monitoração da corrosão interna em dutos consiste em determinar as taxas de corrosão para avaliar o potencial de corrosividade do fluido. Atualmente, esta etapa é realizada utilizando cupons de corrosão e sondas de resistência elétrica (RE), inseridas na tubulação [1]. Essas técnicas requerem intervenções periódicas, seja para a troca dos cupons de corrosão e sua posterior avaliação, como para a substituição do elemento sensor da sonda de resistência elétrica. A frequência de troca de cupom e do elemento sensor das sondas varia de acordo com a corrosividade do fluido [2, 3].

Por outro lado, os equipamentos não intrusivos estimam a tendência da taxa de corrosão através de dispositivos instalados no lado externo da tubulação. A grande vantagem em utilizar essas técnicas é a ausência de intervenções para troca e / ou manutenção de componentes, diminuindo os riscos de operação de recuperação e otimizando a logística da monitoração da corrosão. No entanto, estes equipamentos geralmente tem baixa sensibilidade em comparação com métodos convencionais (intrusivos) [4].

Foram realizados testes em condições dinâmicas, variando as características do fluido para verificar a velocidade de resposta de cada dispositivo utilizado para monitoração da corrosão. Os resultados de perda de metal e taxa de corrosão foram comparados entre si, considerando tanto as técnicas intrusivas, quanto as não intrusivas.

Metodologia

Os testes de corrosão foram realizados em circuito fechado (*loop*) e o meio corrosivo escolhido foi água aerada com e sem contaminantes, resultando em meios com corrosividade diferente. O *loop* de teste consiste em tubos de 2 polegadas feitos de aço carbono, internamente revestidos com FBE.

Os equipamentos foram instalados em uma seção de teste, um carretel de aço carbono de 4 polegadas, na região superior do *loop*. O fluido escoar no sistema através de uma bomba que pode operar a uma vazão de até 100 L / min. Todos os testes foram realizados à temperatura ambiente

A Figura 1 mostra uma imagem do circuito de teste.



Figura 1: Loop utilizado para os testes em laboratório.

Foram utilizados seis dispositivos não intrusivos além de cupons de corrosão e duas sondas de resistência elétrica. Dos seis equipamentos não intrusivos, cinco são baseados no método ultrassônicos e apenas um possui o princípio físico baseado no método de campo elétrico.

Além destes equipamentos, foram utilizados quatro cupons de corrosão em duas conexões de acesso (haste múltipla contendo dois cupons cada) e duas sondas RE diferentes: uma de alta sensibilidade (HS) e uma sonda RE convencional.

A Figura 2 mostra as duas conexões de acesso utilizadas para os cupons, a sonda RE convencional e a sonda de alta sensibilidade (da esquerda para a direita). A sonda RE convencional tem espessura de sensor de 50 mils enquanto que a de alta sensibilidade possui elemento sensor de 10 mils de espessura.



Figura 2: Dispositivos intrusivos utilizados no teste.

O objetivo principal desses testes foi avaliar a corrosividade dos meios estudados através de diferentes métodos de monitoração da corrosão para avaliar a sensibilidade de cada equipamento quando comparado aos cupons de corrosão e sondas de resistência elétrica. Foram simuladas três condições diferentes utilizando duas diferentes soluções aquosas. A Tabela 1 apresenta as condições de teste.

Tabela 1: Condição dos testes.

Condição	Meio	Vazão (L/min)	Duração (dias)	Temperatura	pH (inicial)	pH (final)
A	Água deionizada aerada		30		7	9
B	Água contendo 3,5% NaCl e 100 mg / L ácido acético	100	27	Temperatura Ambiente	3.5	5
C	Água deionizada aerada		33		7	5

O ensaio foi iniciado com a solução aquosa de menor corrosividade (água desionizada aerada, sem contaminantes) durante os trinta dias iniciais sem trocar a solução nesse período. Após 30 dias, o *loop* foi drenado e a solução aquosa foi substituída por água com contaminantes (3,5% de NaCl e 100 mg / L de ácido acético - ver Tabela 1). Após vinte e sete, novamente o circuito de teste foi drenado novamente e a solução foi trocada por água desionizada aerada que circulou por mais trinta e três dias. Desta maneira, o teste total durou noventa dias, com a corrosividade do fluido variando a cada trinta dias, aproximadamente. Os resultados dos três ensaios e suas respectivas discussões serão apresentados abaixo.

Resultados e discussão

Os resultados obtidos pelos equipamentos não intrusivos e as sondas de resistência elétrica são mostrados na Figura 3 através da perda de metal (mm) por unidade de tempo (dias). As setas vermelhas indicam os períodos em que houve troca de solução (Condição A, B e C). Os métodos ultra-sônicos são identificados como "US" e o método do campo elétrico como "CE". A sonda ER de alta sensibilidade não funcionou na condição A porque houve um problema de comunicação inesperado que prejudicou seus resultados. Portanto, o resultado dessa sonda não foi mostrado na Figura 3.

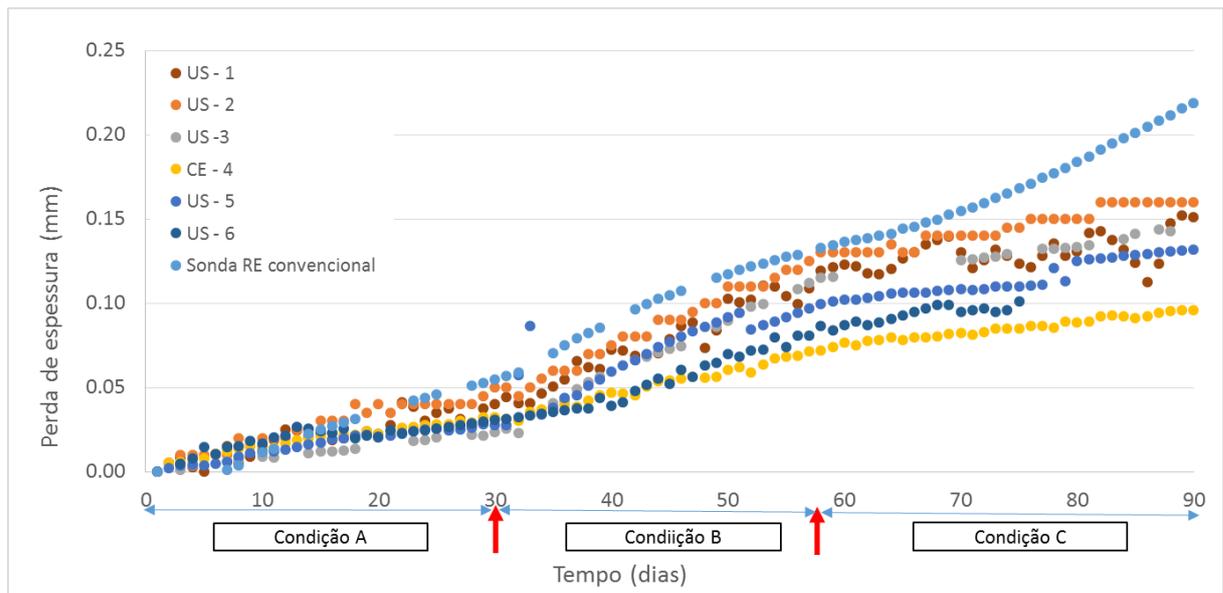


Figura 3: Perda de metal obtida através dos equipamentos intrusivos e não intrusivos.

A Figura 4 mostra a comparação da média da taxa de corrosão obtida pelos cupons de perda de massa e a média da taxa de corrosão obtida através dos equipamentos não intrusivos.

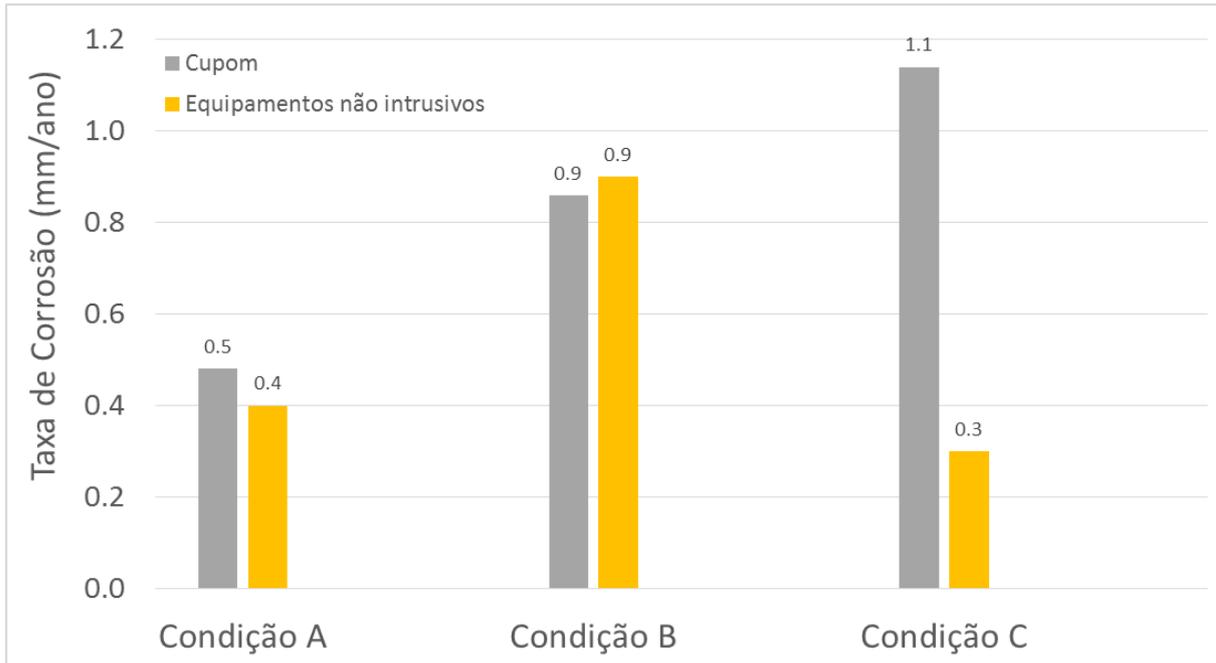


Figura 4: Taxa de Corrosão medida através dos cupons, sondas de RE e equipamentos não intrusivos para cada condição testada.

Na condição A (pH neutro com água destilada), todos os equipamentos apresentaram baixa perda de metal (média de 0,4 mm/ano em 30 dias) sendo consistente com a condição simulada e com o resultado do cupom. Após os trinta dias iniciais é possível observar a variação na inclinação das curvas entre as condições A e B (Figura 3), indicando que houve um aumento na corrosividade do fluido observado por todos os equipamentos, intrusivos e não intrusivos. Estes resultados ocorreram como esperado, devido à troca da solução de pH neutro (Condição A) para uma solução de pH mais baixo (Condição B). A Figura 4 confirma que a taxa de corrosão média na condição B aumentou.

No entanto, na condição C (água desionizada, pH neutro) houve uma divergência entre os equipamentos intrusivos e não intrusivos, já que o primeiro mostrou um aumento na taxa de corrosão em relação à condição B e os equipamentos não intrusivos mostraram redução na taxa de corrosão, em comparação com a condição B (Figura 4).

A Tabela 2 mostra que nas condições A e B os valores de pH medidos foram similares aos valores simulados. No entanto, na condição C, a solução aquosa final apresentou uma acidificação inesperada (o pH caiu de 6,7 para 5,3). No início do teste C, o pH (medido e simulado) apresentou valor próximo do neutro (6,7 e 7,0 respectivamente). Esta redução do pH pode ter ocorrido devido a contaminação da água deionizada com a solução da condição B que continha ácido acético.

No entanto, a simulação termodinâmica não indica uma diminuição significativa do pH com uma contaminação da solução da condição C com até 10% da água utilizada na condição B (pH simulado 6,9). Outra hipótese seria que, com a mudança de inventário de uma solução ácida para uma solução neutra / alcalina, o ferro dissolvido poderia sofrer hidrólise, o que resultaria em uma diminuição do pH, conforme descrito na equação 1.

Tabela 2: pH e teor de Ferro do fluido monitorado e simulado no OLI STUDIO ANALYSER

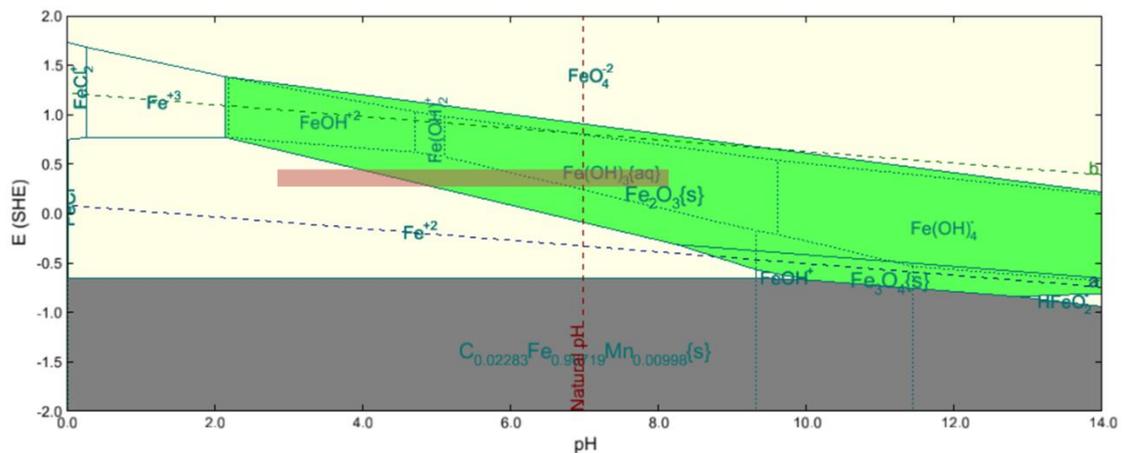
Condição	pH inicial simulado	pH inicial medido	pH final simulado	pH final medido	Ferro dissolvido simulado mg/kg	Ferro dissolvido medido mg/kg
A	7	6,8	9,4	8,9	0,75	NA
B	3,7	3,7	6,1	5,3	45	NA
C	7	6,7	9,4	5,3	0,75	13,3



Equação 1

A Figura 5 mostra o diagrama Pourbaix obtido pelo software de simulação OLI STUDIO ANALYZER 9.1 para o meio estudado. O retângulo vermelho indica a região do potencial de corrosão do aço carbono ($E = +0,44 \text{ V (H)}$ a 25°C). Na água ácida (condição B), uma ampla região do domínio do processo corrosivo é favorecida pela presença de O_2 no meio. Em meio neutro e alcalino, o retângulo representa a região propensa à precipitação de óxido de ferro.

Assim, uma maior geração de produtos de corrosão é esperada para o teste de água neutra (condição C). Este diagrama também favorece o argumento de hidrólise de ferro, porque com a mudança abrupta no pH durante a troca de inventário, o equilíbrio foi deslocado da região de corrosão para a região de precipitação de óxido de ferro (passivação).

Figura 5: Diagrama de Pourbaix para o Fe em água a 25°C (OLI ANALYSER STUDIO 9.1).

A Figura 6 mostra uma fotografia da seção interna do tubo de ensaio após a condição C. Os produtos de corrosão (hidróxido de ferro) estão distribuídos em todas as geratrizes do tubo com elevada espessura, indicando uma alta taxa de precipitação de ferro. No entanto, na geratriz inferior (posição seis horas) a jusante da curva, onde cupons e sondas ER foram instalados, é possível observar que houve remoção considerável do produto de corrosão.



Figura 6: Vista interna da seção do tubo logo após a curva.

Além do efeito protetor causado pela precipitação dos produtos de corrosão na condição C, a variação do fluxo deve ser considerada. Isso ocorre porque a seção de teste tem um diâmetro de 4 polegadas, mas a parte inferior do loop tem um diâmetro menor (2"). Considerando a vazão da bomba de 100 L / min e o diâmetro de 4 polegadas, a velocidade de fluxo é da ordem de 0,2 m / s. Conforme apresentado na Figura 7, na parte inicial do tubo de 4 polegadas, onde os instrumentos intrusivos (cupons e sondas ER) foram instalados, observou-se alguma turbulência (simulação CFD) devido à variação do diâmetro e à curva de 90°. Esta turbulência provavelmente removeu os produtos de corrosão que foram aderidos na geratriz inferior, causando diferença na taxa de corrosão medida por instrumentos intrusivos e não intrusivos, principalmente na condição C. Esta análise é bastante consistente com a imagem mostrada na Figura 6, onde pode-se observar que realmente houve a remoção do produto de corrosão na região onde os cupons de corrosão e as sondas ER foram instalados.

Isso pode explicar por que, na condição C, a taxa de corrosão observada pelos equipamentos intrusivos, que foram instalados na região de maior turbulência, permaneceu elevada, enquanto os dispositivos não intrusivos instalados na região de fluxo laminar apresentaram menor taxa de corrosão em comparação com a condição B (Tabela 3). Assim, devido à precipitação de óxido / hidróxido de ferro na condição C devido à baixa solubilidade do ferro a pH neutro, a turbulência contribuiu para a redução das características de proteção que esses produtos poderiam exercer no aço carbono, na região onde os instrumentos intrusivos foram instalados.

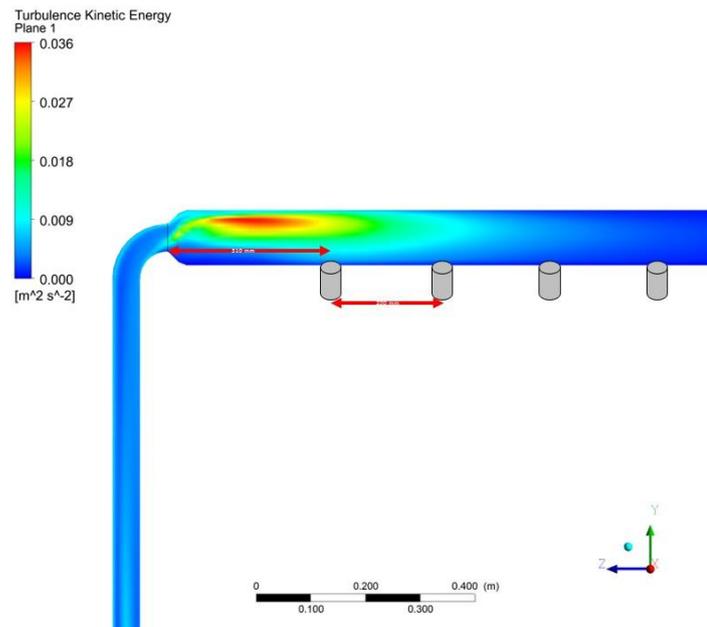


Figura 7: Simulação CFD mostrando a energia cinética após a mudança de diâmetro e a curva.

Conclusões

Após a análise dos resultados, é possível concluir que:

- Os cupons de corrosão e a sonda de ER convencional mostraram resultados muito consistentes, tanto na tendência de taxa de corrosão quanto em seus valores absolutos.
- Todos os equipamentos não intrusivos avaliados mostraram a mesma tendência de taxa de corrosão quando comparados aos equipamentos intrusivos (cupom e sonda ER). A exceção foi na condição C onde os equipamentos intrusivos sofreram processo corrosivo diferente em relação aos equipamentos não intrusivos.
- Foi possível monitorar a corrosão interna com os equipamentos não intrusivos, nas condições testadas. No entanto, não foram avaliadas condições com taxas de corrosão menores do que 0,1 mm/ano.
- O gerenciamento da corrosão interna utiliza vários recursos para garantir a integridade de dutos. Este trabalho mostrou que os equipamentos não intrusivos poderiam ser mais uma técnica a ser escolhida para esta proposta.

Referências bibliográficas

- ROBERGE, P.R., Corrosion Inspection and Monitoring. Ed. MacGraw-Hill. 2007.
- NACE SP0775 – 2013, Preparation, Installation, Analysis, and Interpretation of Corrosion Coupons in Oilfield Operations. 2013.
- N-2785 rev. C, Monitoração, Interpretação e Controle da Corrosão Interna de Dutos, 2016. PETROBRAS.
- NACE 3T199, Techniques for Monitoring Corrosion and Related Parameters in Field Application. 2012