

---

Copyright 2016, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2016, em Búzios/RJ no mês de maio de 2016.

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

### **Sistema de alarme de produtos corrosivos acoplado a sondas de resistência elétrica e resistência de polarização linear – ensaios estáticos.**

Sidney Oswaldo Pagotto Júnior<sup>1</sup>, Neusvaldo Lira de Almeida<sup>2</sup>, Lorena Cristina de Oliveira Tiroel<sup>3</sup>, José Álvaro de Carvalho Albertini<sup>4</sup>, Paulo Roberto V. Moraes<sup>5</sup>, André Luiz Burdin

Bueno

#### **Abstract**

The Laboratory of Corrosion and Protection IPT and Petrobras Transporte SA - Transpetro currently developing a project to evaluate an alarm system that enables you quickly detect changes in corrosiveness of the products transported inside of pipelines. This study has being developed by means of static and dynamic tests using high sensitive electrical resistance probes (ER) and linear polarization resistance (LPR) to determine the corrosivity of the products. This work shows the results of static tests performed with ER and LPR probes having initially as a means sodium chloride solution 0.5% and 5.0% and then, crude oil and produced water. In the tests performed with these two probes it was possible to clearly identify the change corrosivity when performing the exchange of the test medium. The tests with the probe electrical resistance (ER) allowed the identification of the change of the test medium with good precision and speed through the variation of weight loss. The tests with the linear polarization resistance probe (LPR) exhibited fast and accurate corrosion rate responses.

**Keywords:** alarm, corrosiveness, corrosion, pipeline, probe

---

<sup>1</sup> Engenheiro – Pesquisador do Laboratório de Corrosão e Proteção do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. [sidneyjr@ipt.br](mailto:sidneyjr@ipt.br)

<sup>2</sup> Mestre em Engenharia - Chefe do Laboratório de Corrosão e Proteção do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. [neusval@ipt.br](mailto:neusval@ipt.br)

<sup>3</sup> Mestre em Engenharia Química pela UNICAMP – Bacharel em Engenharia Química pela UFPR – Especialização em Engenharia de Terminais e Dutos pela Universidade PETROBRAS – Engenheira Plena da Petrobras Transporte S.A. [lorenacristina@petrobras.com.br](mailto:lorenacristina@petrobras.com.br)

<sup>4</sup> Mestre em Engenharia de Controle de Processos Químicos e Bioquímicos e Especialista em Instrumentação, Automação e Controle de Processos pelo Instituto Mauá de Tecnologia – Engenheiro Pleno da Petrobras Transportes S.A. [alvaro.albertini@petrobras.com.br](mailto:alvaro.albertini@petrobras.com.br)

<sup>5</sup> Consultor Técnico da Petrobras Transportes S.A. [parovimo@petrobras.com.br](mailto:parovimo@petrobras.com.br) **This study has being developed**

**Resumo**

O Laboratório de Corrosão e Proteção do IPT e a Petrobras Transporte S.A. - Transpetro desenvolvem atualmente um projeto visando avaliar um sistema de alarme que permita detectar rapidamente mudanças na corrosividade dos produtos que passam no interior de seus dutos. Este estudo está sendo desenvolvido por meio de ensaios estáticos e dinâmicos, utilizando sondas de resistência elétrica de alta sensibilidade (RE) e de resistência de polarização linear (LPR) para verificar a corrosividade dos produtos a serem testados. Neste trabalho, estão apresentados os resultados dos ensaios estáticos realizados com as sondas RE e LPR, inicialmente tendo como meio soluções de cloreto de sódio 0,5% e 5,0% e posteriormente, petróleo bruto e água produzida. Nos ensaios realizados com estas duas sondas foi possível identificar claramente a mudança de corrosividade ao se efetuar a troca do meio de ensaio. Os ensaios realizados com a sonda de resistência elétrica (RE) permitiram identificar a mudança do meio de ensaio com boa precisão e rapidez por meio da variação da perda de massa. Já os ensaios com a sonda de resistência de polarização linear (LPR) apresentaram respostas de taxa de corrosão rápidas e precisas.

**Palavras-chave:** alarme, corrosividade, corrosão, duto, sonda

**Introdução**

---

Linhas industriais de transporte de petróleo e derivados, assim como de água industriais, estão sujeitas permanentemente à corrosão decorrente da agressividade dos fluidos transportados. O desconhecimento das características de corrosividade de determinados fluidos pode resultar em danos à malha duto viária, especialmente se houver mudanças repentinas no bombeio de produtos com características diferentes.

Neste estudo, um sistema de alarme que identifique rapidamente tais mudanças bruscas de corrosividade em fluidos, está sendo desenvolvido em laboratório em um loop de corrosão de aço-carbono revestido internamente com material polimérico, de maneira a simular linhas de transporte de petróleo e derivados. Este loop contém uma seção de teste feita em polímero, na qual estão instaladas sondas de resistência elétrica de alta sensibilidade (RE) e de resistência de polarização linear (LPR). O ensaio consiste em fazer passar pelos sensores um líquido A com uma dada corrosividade e, em seguida, interromper o fluxo deste líquido e introduzir quase que simultaneamente um líquido B com outra corrosividade, verificando o tempo de resposta do sensor destas duas sondas.

Previamente aos ensaios dinâmicos no loop de corrosão, foram realizados ensaios estáticos, utilizando inicialmente duas soluções de cloreto de sódio (0,5% e 5%), à temperatura ambiente, cujos resultados são apresentados neste trabalho. Posteriormente, estes ensaios foram repetidos, utilizando petróleo bruto e água produzida.

**Metodologia**

---

A determinação da taxa de corrosão via sonda de resistência elétrica (RE) baseia-se no princípio de que há uma variação no valor da resistência elétrica, quando a seção transversal

de um elemento sensor é reduzida devido à corrosão. A variação da resistência é medida cumulativamente ao longo do tempo contra um resistor referência encapsulado na sonda, tendo como base a medida inicial de resistência do sensor. Desta forma, a instalação de uma sonda RE no meio de interesse permite realizar um monitoramento da taxa de corrosão do metal neste meio, o que pode ser feito de forma contínua, com uso de *data logger*, ou periódica, com a utilização de um equipamento portátil.

Neste trabalho, a determinação da taxa de corrosão por meio de sonda RE foi realizada utilizando-se os seguintes equipamentos:

- sonda de resistência elétrica (RE) de alta-resolução marca Rohrbach Cosasco Systems, modelo Microcor M4700 com elemento tangencial (*flush*) e sensor com cinco milésimos de polegada de vida útil, fabricado em aço-carbono UNS K03005;
- conector rígido para conexão entre a sonda RE e o transmissor de dados;
- transmissor de dados MT-9485A;
- cabo de comunicação entre o transmissor e uma caixa contendo uma fonte conversora de 115 V<sub>ca</sub> para 24 V<sub>cc</sub> e conversor de padrão de comunicação de RS485 para RS232, para a interligação dos dados entre o transmissor e o computador;
- um computador com sistema operacional Windows<sup>®</sup> e software de corrosão Microcor.

A metodologia para a realização dos ensaios via sonda RE foi a seguinte:

- imersão da sonda RE no meio de ensaio “A” e realização de medidas de perda de massa e de taxa de corrosão durante um período de 6 a 8 horas;
- troca de solução para o meio de ensaio “B” sem parar a aquisição de dados e realização de medidas durante um período de 16 horas;
- troca novamente de solução para o meio de ensaio “A” sem parar a aquisição de dados e realização de medidas durante um período de 6 a 8 horas.

Os horários em que foram efetuadas as trocas de solução foram anotados, para que ao final de cada ensaio fosse possível comparar os horários de troca de solução com o comportamento da curva no gráfico obtido. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente e sem agitação. A Figura 1 apresenta uma vista geral do conjunto montado, incluindo o sistema de aquisição de dados. A Figura 2 apresenta o conjunto formado por sonda, conector e transmissor, com a sonda imersa em um meio de teste.



Figura 1 – Vista do conjunto montado.

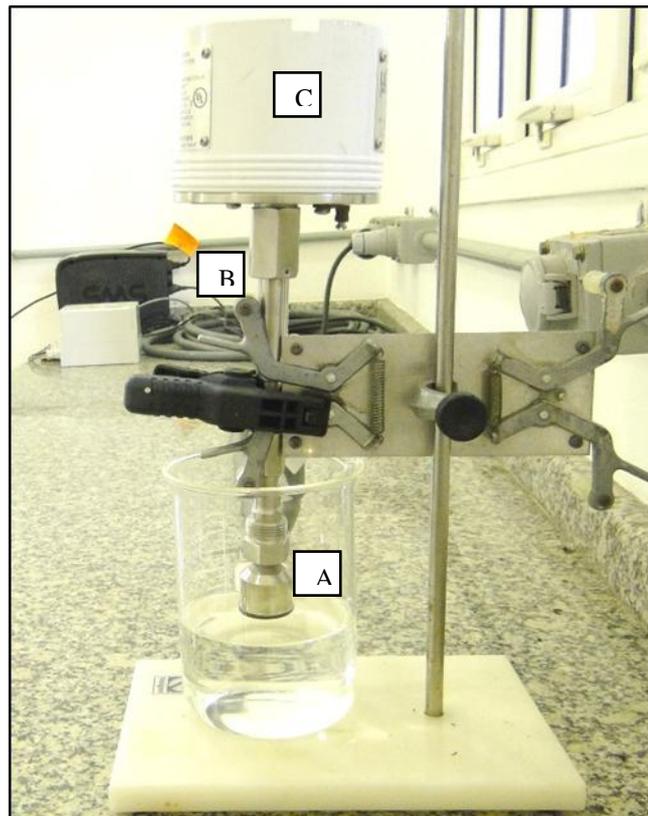


Figura 2 – Sonda RE (A), conector (B) e transmissor de dados (C), com a sonda imersa em um meio de ensaio.

Tal como comentado em relação à sonda de resistência elétrica (RE), também é possível monitorar a taxa de corrosão por meio da instalação de uma sonda de resistência de polarização linear (LPR) no meio de interesse. Neste trabalho, isto foi feito com auxílio de um potenciostato, como veremos a seguir.

Para a determinação da taxa de corrosão por meio de sonda LPR, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- sonda de resistência de polarização linear marca Rohrback Cosasco Systems modelo Corratel 6080 com elementos de medição do tipo dois eletrodos de inserção, fabricados em aço carbono UNS K03005um cabo para conexão da sonda de resistência de polarização linear ao potenciostato;
- potenciostato marca Bio-Logic, modelo VMP3 multicanal, configurado de forma a executar medidas de resistência de polarização linear;
- computador com sistema operacional Windows<sup>®</sup> e software EC-Lab instalado.

A metodologia para a realização dos ensaios com a sonda LPR foi a seguinte:

- imersão da sonda LPR no meio de ensaio “A” e, com auxílio do potenciostato, aplicação de uma pequena perturbação de potencial de  $\pm 8$  mV a 0,5 mV/s, sendo adquiridos dados durante um período de 6 a 8 horas;
- troca de solução para o meio de ensaio “B”, sem parar a aquisição de dados, sendo realizadas medidas durante um período de 16 horas;
- troca de solução novamente para o meio de ensaio “A” sem parar a aquisição de dados e realização de medidas durante um período de 6 a 8 horas.

Ao final do ensaio, os dados adquiridos foram tratados pelo software EC-Lab, de forma a obter os valores de  $R_p$  e as taxas de corrosão correspondentes, sendo então plotadas as curvas de taxa de corrosão versus tempo de ensaio com auxílio do software Excel. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente e sem agitação, sendo registrados os tempos de imersão entre as trocas de solução. A Figura 3 apresenta uma vista geral do conjunto montado, incluindo o sistema de aquisição de dados. A Figura 4 apresenta a sonda imersa, durante a realização do ensaio.

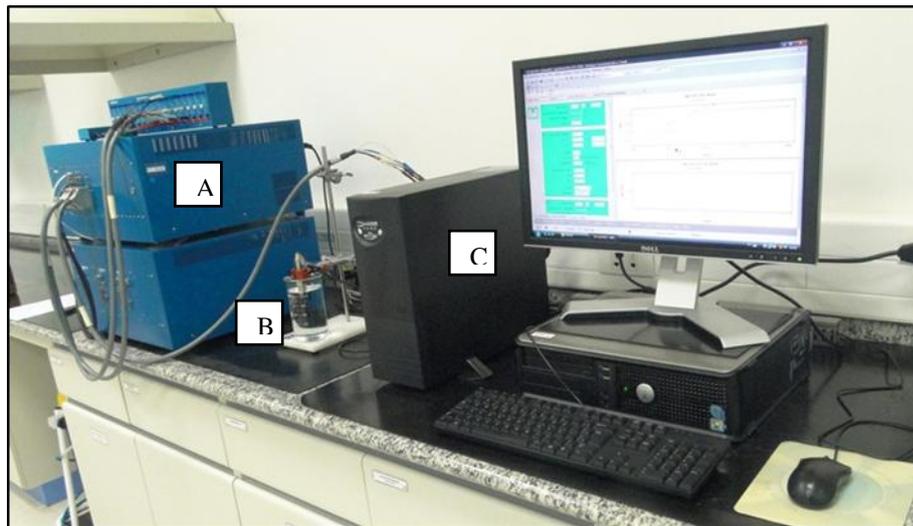


Figura 3 – Vista do conjunto montado. Observa-se o potenciostato (A) a sonda de resistência de polarização imersa na solução de ensaio (B) e o computador com software EC-Lab, utilizado para aquisição e tratamento de dados (C).

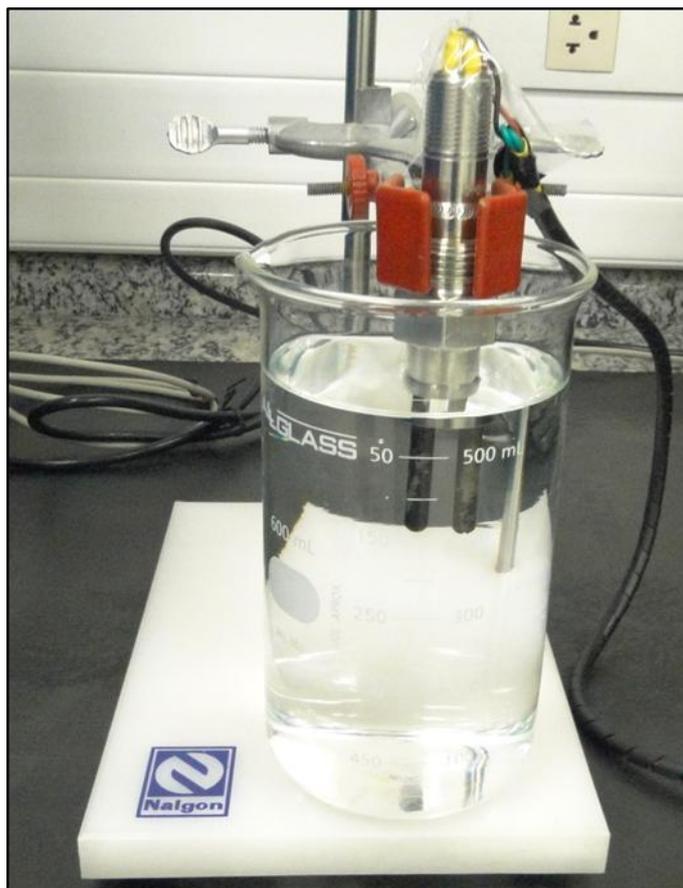


Figura 4 – Aspecto visual da sonda de resistência de polarização linear imersa no meio de ensaio.

## Resultados

### Perda de massa e taxa de corrosão – sonda RE

Inicialmente, foram realizados ensaios utilizando soluções de cloreto de sódio 0,5% e 5,0%. A Figura 5 apresenta a perda de massa e a taxa de corrosão no decorrer de um ensaio onde a sonda foi imersão em solução de NaCl 0,5%, depois em NaCl 5,0% e novamente NaCl 0,5%. Estão destacados, em vermelho, os momentos onde houve troca da solução.

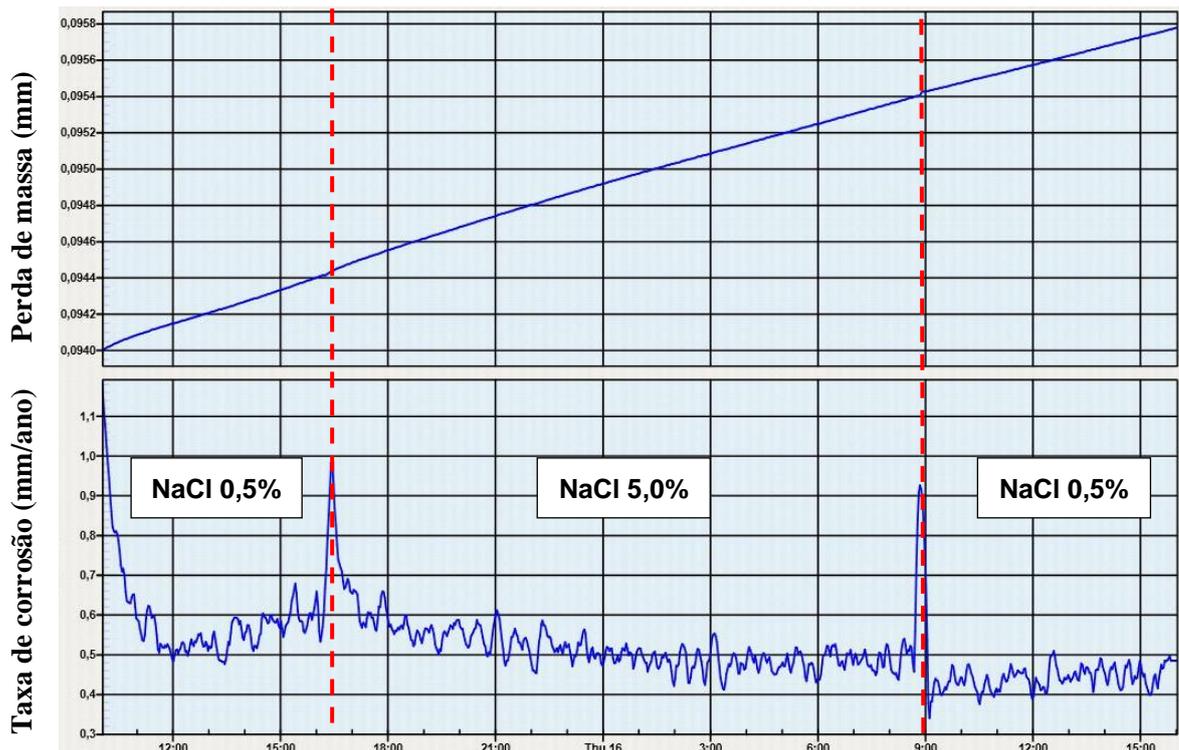


Figura 5 – Perda de massa e da taxa de corrosão durante o ensaio com sonda de resistência elétrica imersa em soluções de NaCl 0,5%, Na Cl 5,0 % e novamente NaCl 0,5 %

A seguir, os ensaios foram repetidos em petróleo bruto e água produzida. A Figura 6 apresenta a perda de massa e a taxa de corrosão no decorrer de um ensaio onde a sequência de imersão foi petróleo bruto, água produzida e novamente petróleo bruto. A Figura 7 apresenta a perda de massa e a taxa de corrosão no decorrer do ensaio com água produzida, petróleo bruto e novamente água produzida. Nos dois casos, estão destacados, em vermelho, os momentos onde houve troca do meio de ensaio.

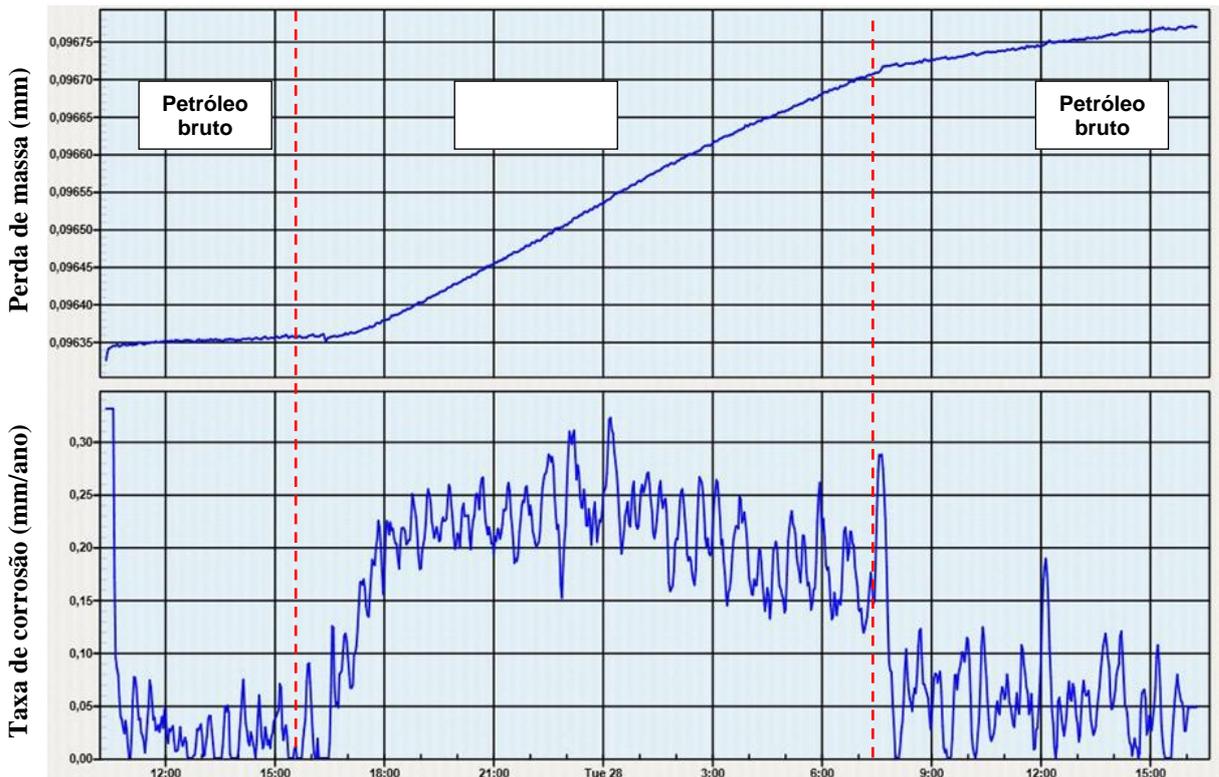


Figura 6 – Perda de massa e taxa de corrosão durante o ensaio com sonda de resistência elétrica imersa em petróleo bruto, água produzida e novamente petróleo.

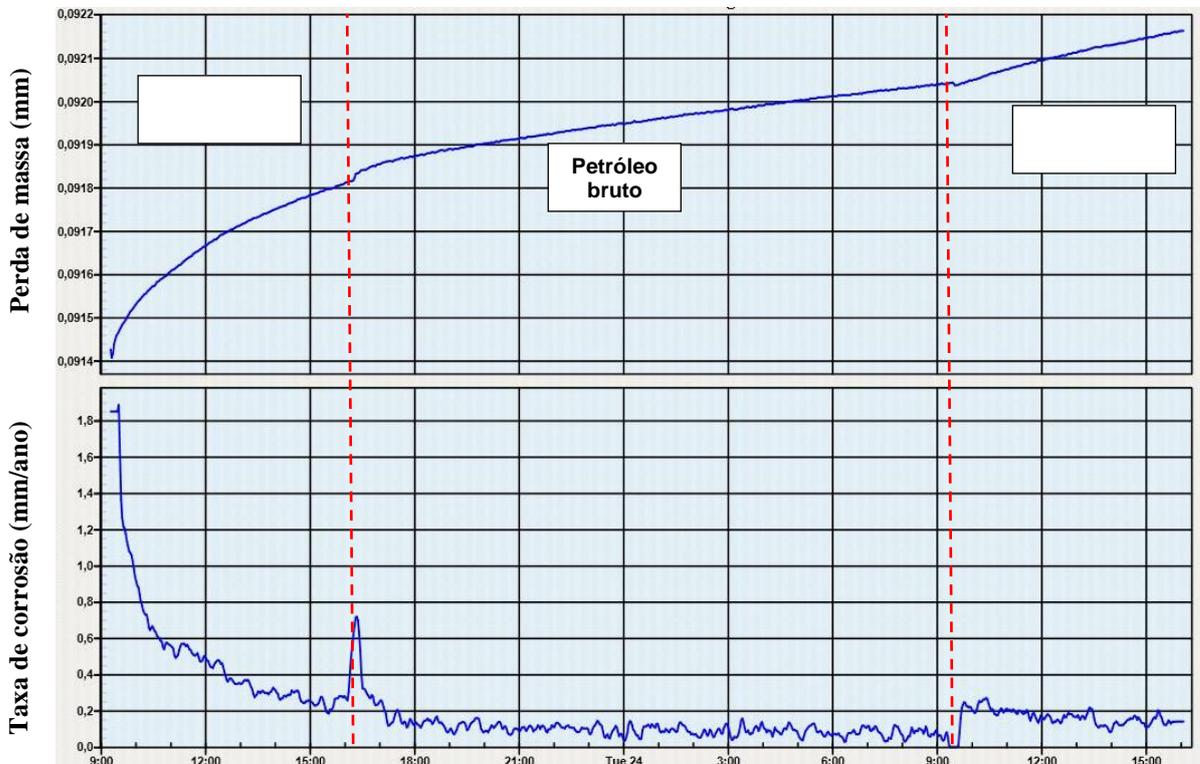


Figura 7 - Variação de perda de massa e da taxa de corrosão durante o ensaio com sonda de resistência elétrica imersa alternadamente em água produzida e petróleo bruto.

### Perda de massa e taxa de corrosão – sonda LPR

Os ensaios com sonda de resistência de polarização linear (LPR) também foram divididos em duas etapas: inicialmente, foram utilizadas soluções de cloreto de sódio com concentrações de 0,5% e 5,0%; posteriormente, foram realizados ensaios com petróleo bruto e água produzida. A Figura 8 apresenta a taxa de corrosão no decorrer de um ensaio com soluções de cloreto de sódio 0,5%, 5,0% e novamente 0,5%. Estão destacados, em vermelho, os tempos decorridos até o momento onde houve troca do meio de ensaio.

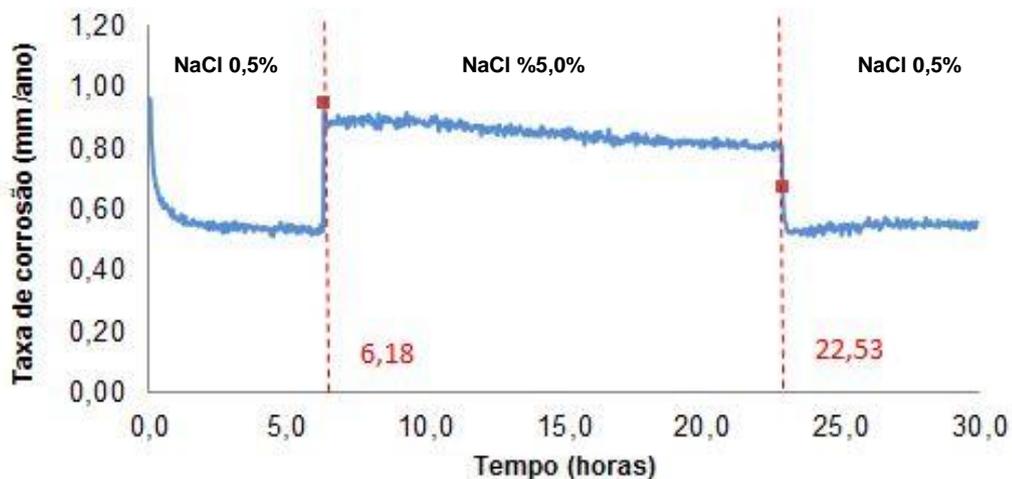


Figura 8 - Taxa de corrosão durante o ensaio com sonda LPR imersa alternadamente em soluções de NaCl 0,5%, NaCl 5,0% e novamente NaCl 0,5%.

A seguir, os ensaios foram repetidos, agora utilizando como meio petróleo bruto e de água produzida. A Figura 9 apresenta a taxa de corrosão no decorrer do ensaio com petróleo bruto, água produzida e novamente petróleo. A Figura 10 apresenta a taxa de corrosão no decorrer do ensaio com água produzida, petróleo bruto e novamente água produzida. Nos dois casos, estão destacados, em vermelho, os momentos onde houve troca do meio de ensaio.

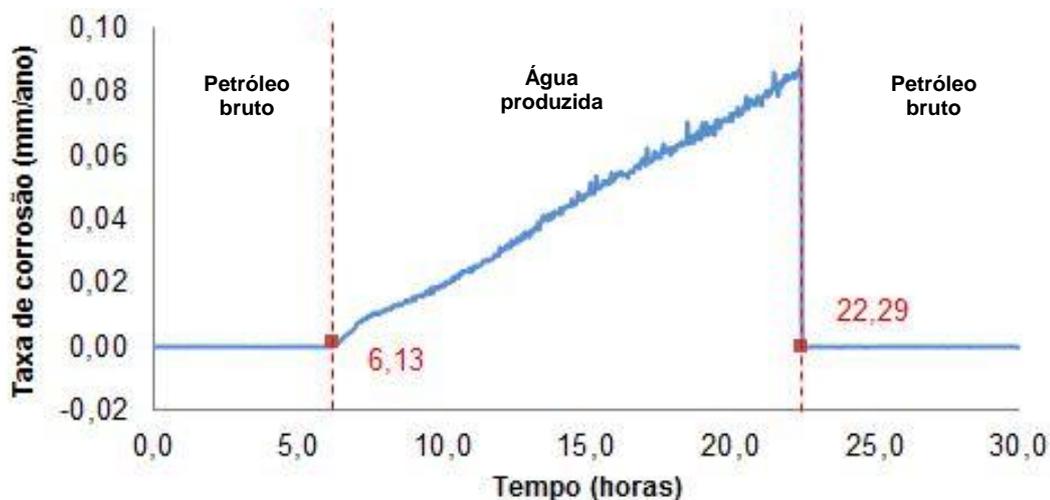


Figura 9 - Taxa de corrosão durante o ensaio com sonda LPR imersa alternadamente em petróleo bruto, água produzida e novamente em petróleo bruto.

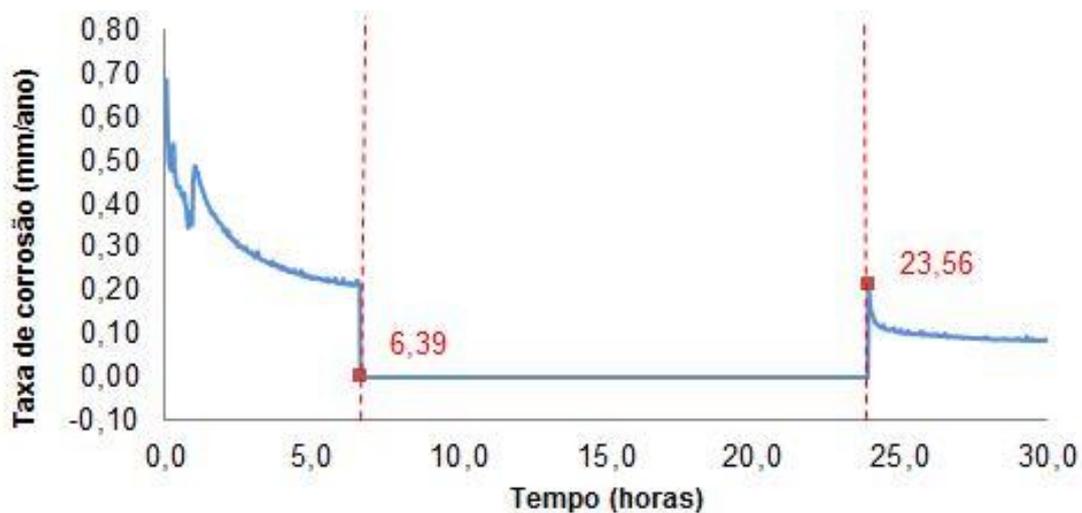


Figura 10 - Taxa de corrosão durante o ensaio com sonda LPR imersa alternadamente em água produzida, petróleo bruto, e novamente água produzida.

## Discussão

Os ensaios com sonda de resistência elétrica (RE) e com a sonda de resistência de polarização linear foram realizados inicialmente em soluções de cloreto de sódio 0,5% e 5,0% e tiveram como principal objetivo o estabelecimento de uma metodologia de ensaio para cada uma das sondas.

Nos ensaios realizados com a sonda de resistência elétrica em meio de cloreto de sódio, foi possível observar uma pequena alteração no comportamento das curvas de perda de massa e de taxa de corrosão, coincidindo com os momentos em que foi efetuada a troca da solução. Esta mesma mudança de comportamento nas curvas foi observada de forma bem mais clara nos ensaios realizados com petróleo e água produzida, provavelmente devido a maior diferença de corrosividade entre estes dois meios de ensaio.

Nos ensaios com petróleo bruto e água produzida, esta diferença de comportamento na curva é observada mais rapidamente nos gráficos de perda de massa; já nos gráficos de taxa de corrosão, verifica-se que é necessário um tempo maior de ensaio para que o valor da taxa de corrosão se estabilize (ver Figuras 6 e 7). Esta diferença no tempo de resposta pode ser atribuída à maneira como o software de corrosão utilizado (Microcor) faz a aquisição e o tratamento de dados em cada caso. Para a perda de massa, os dados são adquiridos e apresentados a cada dois minutos, de forma que com poucas medidas já é possível observar a mudança no comportamento da curva de perda de massa, indicando uma alteração no meio de ensaio. Já para a taxa de corrosão, o software considera um conjunto maior de dados já adquiridos, sendo necessário um período mínimo de duas horas para que este cálculo possa ser realizado. Com base neste resultado, a variação de perda de massa da sonda de resistência elétrica parece ser o parâmetro mais adequado a ser monitorado para que um sistema de alarme possa identificar uma mudança de corrosividade do meio em um curto período de tempo, uma vez que este dado por ser obtido a cada dois minutos.

Em relação ao consumo da sonda de resistência elétrica durante os ensaios realizados, foi constatado um consumo significativo da sonda RE durante os ensaios de imersão nas soluções de cloreto de sódio 0,5% e 5,0%, em função da agressividade destas soluções. No entanto, ao se realizarem os ensaios com petróleo bruto e água produzida, se constatou que o consumo da sonda diminuiu muito, por se tratarem de meios com menor corrosividade. Ao final dos ensaios, o consumo da sonda estava em 205.000 PLU<sup>6</sup>, para uma vida útil total de 262.144 PLU.

Analisando agora os resultados obtidos nos ensaios com a sonda de resistência de polarização linear (LPR), verifica-se que a diferença de corrosividade do meio foi detectada de maneira mais clara já nos ensaios com as soluções de cloreto de sódio. Tanto nos ensaios com soluções de cloreto de sódio com 0,5% e 5,0% (ver Figura 8) como nos ensaios com petróleo bruto e água produzida (ver Figuras 9 e 10), foi possível verificar uma mudança no comportamento das curvas de taxa de corrosão poucos momentos depois da troca do meio de ensaio. Vale lembrar que nos ensaios com a sonda de resistência de polarização linear os dados foram adquiridos e tratados com o auxílio de um potenciostato e do software EC-Lab, sendo a aquisição de dados realizada a cada dois minutos, de forma que as mudanças de comportamento no gráfico indicam uma grande exatidão entre o momento da troca do meio de ensaio e a mudança no comportamento da curva.

Ainda nos ensaios realizados com a sonda LPR, foi observado que durante a sequência água produzida/petróleo/água produzida, após a troca do meio de petróleo bruto para água produzida, a taxa de corrosão não estabilizou. A explicação mais provável é que a sonda LPR, ao ser retirada do petróleo bruto, tinha o seu elemento sensor impregnado com este produto, dada sua viscosidade. À medida que o petróleo bruto foi sendo removido gradualmente do sensor da sonda pelo novo meio (água produzida), ocorreu um aumento da área da sonda exposta a este meio, aumentando consequentemente a taxa de corrosão, que não chegou a estabilizar até que o meio fosse trocado novamente.

## **Conclusão**

---

As técnicas de estudo da corrosividade por meio de sondas de resistência elétrica (RE) e de resistência de polarização linear (LPR) em meio estático mostraram-se eficazes para identificar a mudança de corrosividade ao se efetuar a troca do meio de ensaio. Os ensaios realizados com a sonda de resistência elétrica (RE) permitiram identificar a mudança do meio de ensaio com boa precisão e rapidez no gráfico de perda de massa; já no gráfico de taxa de corrosão foi necessário um tempo maior de aquisição de dados. Os ensaios realizados com a sonda de resistência de polarização linear (LPR) apresentaram respostas de taxa de corrosão rápidas e precisas.

---

<sup>6</sup> *Probe Life Unit*. A sonda tem uma vida útil total de 262.144 PLU.

**Referências Bibliográficas**

---

- (1) ASTM **G59-97**(2014), Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, [www.astm.org](http://www.astm.org), 4p.
- (2) ASTM **G96-90**(2013), Standard Guide for Online Monitoring of Corrosion in Plant Equipment (Electrical and Electrochemical Methods), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, [www.astm.org](http://www.astm.org), 10p.
- (3) ASTM **G102-89**(2010), Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010, [www.astm.org](http://www.astm.org), 7p.
- (4) ROBERGE, P. R., Corrosion maintenance through inspection and monitoring, **Handbook for Corrosion Engineering**, McGraw-Hill, 1999, p. 417,424.